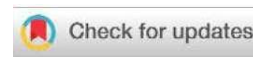


УДК 631.417

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.307>

Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков

© 2025 А. А. Комаров ¹, О. С. Безуглова ²

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский просп., д. 14, г. Санкт-Петербург, 195220, Россия. E-mail: Zelenydar@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», ул. Большая Садовая, 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия. E-mail: lola314@mail.ru

Цель исследования. Подтвердить с помощью четких математических моделей специфичность гумусовых кислот, извлекаемых из разных субстратов различными экстрагентами.

Методы. В статье представлен анализ результатов применения классических методов выделения гумусовых кислот в процессе трансформации растительных остатков, оцененный с помощью математических моделей. Подобный синтез знаний биохимии органического вещества почв и математического моделирования позволил сформировать доказательную базу специфичности гумуса. Путем применения современного программного обеспечения OriginPro в качестве пакета инструментов для анализа данных и подготовки высококачественных визуализаций представлен анализ экспериментов по разложению исходных гумусообразователей – растительных остатков. Модельные исследования по гумификации растительных остатков (лиственной массы клевера) проводили в контролируемых условиях в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и в кварцевом песке. Для экстракции гумусовых веществ применяли дистиллированную воду и 0,1 М раствор пиродифосфата натрия. Определение углерода гумуса проводили методом мокрого сжигания (по Тюрину) с титрометрическим окончанием. Фракционно-групповой состав гумуса определяли по методике И.В. Тюрина, модифицированной Л.Н. Александровой.

Основные результаты. Представлено экспериментальное доказательство специфичности гумусовых веществ, основанное на особенностях их извлечения из почвы с помощью различных экстрагентов и описываемое четкой математической моделью. Обсуждается вопрос о природе гумуса с позиций биохимии почв и анализа математических моделей трансформации растительных остатков в специфические соединения гумуса. Показано, что общим для процесса гумусообразования в почвенной и инертной средах является то, что динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органических остатков на ранних этапах хорошо аппроксимируется простым линейным трендом, причем накопление гуминовых кислот и фульвокислот в разных средах идет практически с одинаковой скоростью. В дальнейшем, по мере уменьшения массы органического субстрата, процесс трансформации переходит в стадию насыщения.

Заключение. На основании изучения процессов гумусообразования в инертной и почвенной средах экспериментально выявлена зависимость количества образующихся в процессе трансформации растительных остатков гумусовых кислот от минералогического (и химического) состава среды. Показано, что способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвы и инертной среды (кварцевый песок) не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности формирования их отдельных групп. При этом во всех случаях динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органических веществ хорошо аппроксимируется простой линейной моделью. Установлено, что на ранних этапах трансформации органического вещества скорость количественного возрастания гуминовых кислот и фульвокислот практически одинакова в разных средах.

Ключевые слова: гумус; гуминовые кислоты; фульвокислоты; дерново-подзолистая почва; кварцевый песок; растительные остатки; гумусообразование.

Цитирование: Комаров А.А., Безуглова О.С. Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. е307. DOI: [10.31251/pos.v8i1.307](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.307)

ВВЕДЕНИЕ

Дискуссии по проблемам гумуса не затихают с момента идентификации этого уникального природного вещества. Скорее всего, они не иссякнут до тех пор, пока будет продолжаться жизнь на планете, где гумус исполняет роль стабилизатора всех наземных экосистем. Это обоснованно, так как гумус является одним из самых сложных природных образований на Земле. Несмотря на прилагаемые усилия до сих пор еще не существует четких химических формул для гуминовых кислот (ГК), а все известные модели имеют гипотетический характер. Они позволяют в той или иной степени объяснить известные на сегодняшний день свойства гуминовых кислот, но не дают адекватного отображения их структуры, расположения атомов и атомных групп. Наибольшую известность получили схемы

строения ГК, изложенные в ряде работ (Касаточкин, 1953; Мистерски, Логинов, 1959; Kleinhempel, 1970; Орлов, 1977, 1992; Orlov, 1992, 1995; Schnitzer, 1991; Stevenson, 1994; и др.), ставших классическими. Со временем пришло понимание, что предлагаемые схемы в значительной степени упрощают строение ГК, но представление о наличии в этих природных образованиях бензолполикарбоновых кислот и других ароматических компонентов, дополненных цепочными структурами боковых радикалов, как правило, неароматического строения, позволило продвинуться дальше в их познании.

Значительным шагом вперед стало понимание, что почвенный гумус представляет собой динамичную открытую диссипативную систему гумусовых веществ (ГВ), подчиняющуюся цикличности, которая периодически в одно и то же время приводит эту систему к вполне определенному, стабильному в данных условиях состоянию (Дергачева, 1984, 2021).

Алессандро Пикколо (Piccolo, 2001, 2002) отталкиваясь от положений и принципов организации соединений супрамолекулярной химии, разработанных Ж.-М. Леном (1998), экспериментально показал, что гуминовые кислоты состоят из низкомолекулярных органических соединений, связанных множественными нековалентными межмолекулярными связями, и имеют супрамолекулярную природу. Развитие этого направления в нашей стране с учетом имеющихся заделов в области супрамолекулярной химии представляется чрезвычайно актуальным (Вацадзе и др., 2022).

Идея об ассоциации самоорганизующихся гетерогенных и относительно небольших молекул, получающихся в результате деградации и разложения мертвого биологического материала, была своеобразно воспринята некоторыми учеными (Lehmann, Kleber, 2015). При этом они радикализировали взгляды на органическое вещество в почве, категорически отбрасывая само понятие «гуминовые вещества» и делая акцент на недоказанности их существования в силу изменения природных соединений процедурами выделения и проявления по этой причине их артефактной сущности. По мнению этих авторов органическое вещество почвы представляет собой континуум продуктов постепенного разложения органических соединений, вследствие чего оно состоит из сложной смеси идентифицируемых биополимеров и не является химически сложным гуминовым материалом с качественно новыми свойствами. Однако для таких кардинальных выводов необходимы более существенные доказательства, чем просто критика метода извлечения ГК из почвы. Как справедливо оценивает эту концепцию А. Пикколо (Piccolo, 2016), аналогичным образом можно отбросить характеристику биомолекул (например, ДНК) только потому, что для их исследования был применен особый вид экстракции. Вызывает возражение отказ этих авторов от понятия *гумус* и потому, что их понимание почвенного органического вещества, как континуума постепенно разлагающихся органических соединений, не подкреплено научно обоснованным альтернативным объяснением химической природы и реакционной способности гуминовых кислот и не объясняет четко проявляющиеся в природе географические закономерности гумусообразования.

Накопленный к настоящему времени обширный массив данных, полученных разными авторами с использованием разнообразных методов, убеждает в обратном: почвенное органическое вещество представляет собой устойчивое в конкретных гидротермических и физико-химических условиях образование. Если бы это была простая смесь (континуум) продуктов постепенно разлагающегося органического опада, то результаты определений были бы непредсказуемыми, географические закономерности в их составе и свойствах было бы невозможно отследить. В действительности сейчас, когда научная мысль и инструментальные возможности вплотную подошли к измерению архитектурных характеристик гуминовых кислот, мы видим, что полученные с использованием электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа результаты сопоставимы.

Так, например, с помощью трансмиссионного электронного микроскопирования и рентгенографии (Baalousha et al., 2005), показано, что надмолекулярная структура гуминовой кислоты представляет собой фибриллы, образующиеся при соединении молекул диаметром около 20 нм, которые авторы называют основой с некоторыми изолированными крупными макромолекулами (30–200 нм). При этом авторы предупреждают, что возможные артефакты, появление которых не исключено при подготовке препаратов ГК к микроскопированию и рентгенографии, могут препятствовать значимости таких наблюдений.

Однако существуют методы идентификации специфических соединений гумуса, основанные на иных принципах, чем экстрагирование. Например, Г.Н. Федотов, С.А. Шоба (2015), также применившие в своих исследованиях электронное микроскопирование, установили наличие в почвах частиц органической природы размером 2–4 нм, которые представляют собой фульвокислоты, и частиц размером 8–12 нм, которые могут относиться, как к фульвокислотам, так и к гуминовым кислотам. В

этом исследовании особую ценность представляет тот факт, что его авторы работали с гелевыми пленками гуминовых веществ, собирающимися на поверхности воды при капиллярном увлажнении высушенных почвенных агрегатов. Иными словами, для выделения ГК авторы не применяли никаких химических обработок – ни жестких, ни мягких, позволяющих предполагать появление ГК в результате распада единой гумусовой матрицы под воздействием химических реагентов.

Применение рентгеноструктурного анализа позволило обнаружить наличие особой матричной структуры гуминовых кислот, включающей от двух до четырех слоев конденсированных систем ароматического типа, дополненных сетью цепочных фрагментов различной степени упорядоченности и протяженности (Bezuglova, 2019). Параметры этой структуры в различных по генезису почвах и в генетических горизонтах одной почвы различны. Однако межплоскостные расстояния фиксируются четко и лежат в пределах от 0,349 до 0,371 нм, а толщина пакета углеродных сеток тем больше, чем выше степень бензоидности гуминовых кислот. Протяженность такого пакета варьирует от 1,8 до 2,34 нм и эта величина вполне сопоставима с результатами, полученными методом электронного микроскопирования (Федотов, Шоба, 2015). Таким образом, на основании многочисленных экспериментальных данных можно считать убедительным факт существования специфических гуминовых кислот. Однако в приведенных выше результатах инструментальных исследований речь идет о надмолекулярной структуре ГК, а численного описания строения ГК количеством атомов в молекуле, числом и типами связей между ними до сих пор нет.

Оппонентами (Lehmann, Kleber, 2015) поставлены, но не разрешены вопросы по поводу влияния экстрагентов на природу почвенного гумуса. К тому же основным доводом в пользу понимания гуминовых веществ как континуума разлагающихся органических остатков, остается упрек в артефактной сущности этих извлекаемых из почв «более или менее темноокрашенных, азотсодержащих высокомолекулярных соединений» (Orlov, 1992, с. 189). Все это позволяет ряду ученых на протяжении многих лет снова и снова отрицать специфичность продуктов гумусообразования. Именно поэтому цель данной работы – подтвердить с помощью четких математических моделей специфичность гумусовых кислот, извлекаемых из разных субстратов различными экстрагентами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве доказательной базы особенностей формирования специфических гумусовых веществ использовались материалы, полученные одним из авторов с применением разнообразных аналитических и инструментальных методов, на основе подходов, разработанных Л.Н. Александровой (1970, 1980), в ходе модельных экспериментов, в которых оценивались особенности влияния условий почвообразования на характер и скорость гумусообразования в почве и в инертной среде. Использовались верхний 0–20 см гумусовый горизонт (пахотный слой) дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Umbric Albeluvisols (IUSS Working Group WRB, 2022) и инертный субстрат – кварцевый песок. Соотношение органической и минеральной частей в экспериментах было 1:10. В качестве органической массы (источников гумуса) вносились разнообразные растительные остатки: листья и корни клевера, хвоя и др. (Александрова, 1970). В данной работе описываются результаты, полученные при использовании в качестве растительных остатков лиственной массы клевера лугового (*Trifolium pratense*). Эксперимент проводили в течение 2-х лет в контролируемых аэробных условиях: температурный режим 22–25°C, условия увлажнения 60% от полной полевой влагоемкости. В ходе эксперимента определяли содержание углерода гумуса и его фракционно-групповой состав. Образцы отбирали на 3, 7, 17, 30 и 180 сутки, а также через 6, 12 и 24 месяца с начала эксперимента. Содержание углерода оценивалось при мокром озолении раствором бихромата калия в присутствии серной кислоты, избыток окислителя учитывали титриметрически с оксифенилантрахиловой кислотой – метод Тюрина в модификации Симакова (Аринушкина, 1970). Образующиеся в процессе трансформации растительных остатков промежуточные продукты разложения и гумусовые вещества извлекались последовательно водой и 0,1 М раствором пиродифосфата натрия с pH = 9,6. В каждой фракции гуминовые кислоты осаждались H₂SO₄ при pH = 1. Метод фракционирования, предложенный Л.Н. Александровой, представляет собой модификацию метода Тюрина. Он подробно описан в диссертации М.Ф. Люжина (1968). Таким образом, для извлечения гуминовых веществ применялись не только щелочные экстрагенты, но и вода.

Для анализа результатов экспериментов использовалось программное обеспечение OriginPro, версия 7,5 (www.originlab.com), широко практикуемое в научных кругах и государственных лабораториях по всему миру. К сожалению, этот инструментальный мало используется в отечественном

почвоведении. Базис исследований представлен в методическом руководстве В.Ф. Дричко, А.А. Изосимова (2011) и публикациях С.Е. Витковской (2015, 2016). В частности, анализ процессов, характеризующихся ростом и накоплением, проводится с построением модели роста с насыщением. Такая модель не предполагает ограничение функции (т.е. отсутствие насыщения) и неприменима, когда значение функции достигает «слишком большого значения». Примером модели может служить рост населения в определенный период времени до наступления насыщения. В данной работе использован такой же подход, но относительно приращения содержания углерода гуминовых кислот ($C_{ГК}$) за единицу времени в процессе трансформации органического вещества. Если рассмотреть нарастание (изменение) показателя приращения, в нашем случае $C_{ГК}$, при трансформации исходных гумусообразователей за единицу времени, то здесь можно использовать показатель «удельной скорости роста...». Величина эта зависит от скорости клеточного деления и может служить для сравнения скоростей разных видов и сортов.

Динамику изменения оцениваемых показателей можно аппроксимировать линейной моделью. Так, в работе С.Е. Витковской (2015) приведена модель выноса элементов питания (калия, азота, фосфора и кальция), представленная в виде:

$$W(t) = W_0 + bt, \text{ где}$$

$W(t)$ – вынос элемента растениями на момент времени t ;

W_0 – вынос растениями 1-го отбора (начало процесса);

bt – скорость выноса элемента растениями, г/сут.

Эта модель аналогична представленной нами во всем, за исключением маркировки основного показателя:

$$C(t) = C_0 + bt, \text{ где}$$

$C(t)$ – содержание $C_{ГК}$ в субстрате на момент времени t ,

C_0 – содержание $C_{ГК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г,

bt – скорость возрастания содержания $C_{ГК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные модели, доказывающие формирование гуминовых кислот и фульвокислот в процессе гумусообразования, представлены на рисунках 1 и 2, а их параметры – в таблицах 1 и 2.

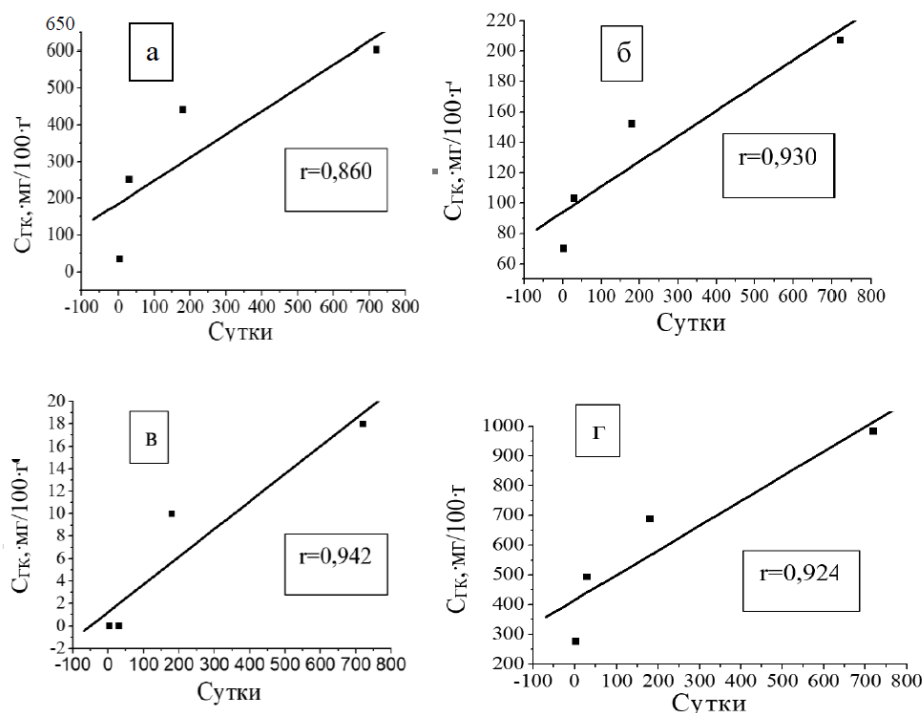


Рисунок 1. Содержание углерода гуминовых кислот в процессе трансформации органического вещества в зависимости от среды/экстрагента: а – песок/вода; б – песок/ $Na_4P_2O_7$; в – почва/вода; г – почва/ $Na_4P_2O_7$.

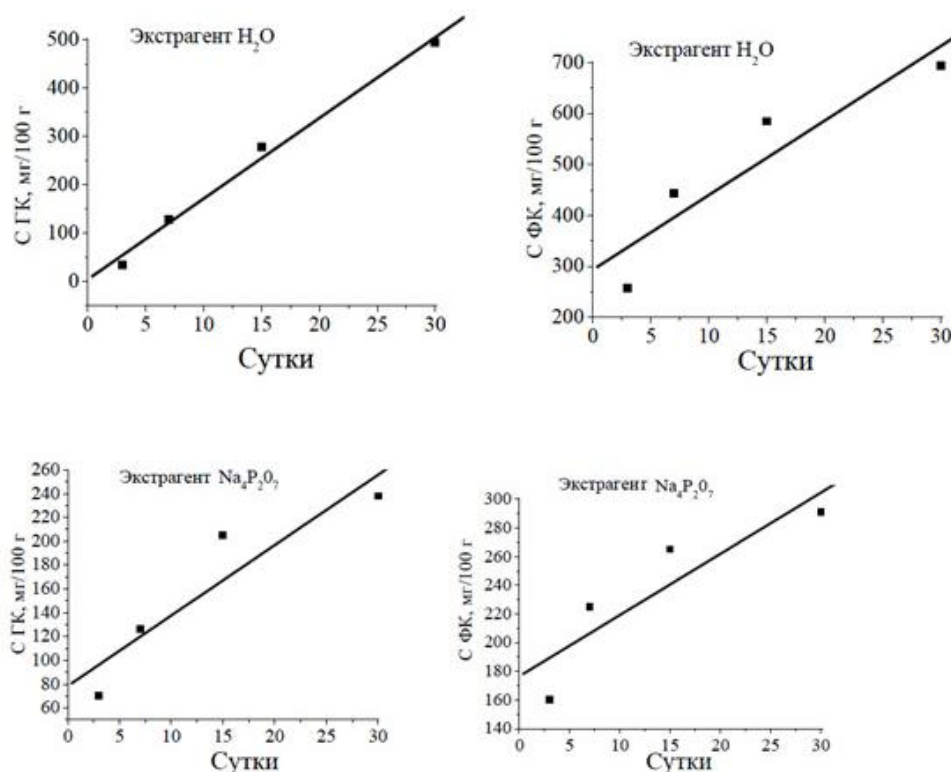


Рисунок 2. Динамика формирования гуминовых веществ (ГК и ФК) в инертном субстрате.

На рис. 1 показано, что трансформация растительных остатков клевера в почвенной среде и в инертном субстрате протекает неодинаково, однако проявляется единая направленность процесса – формирование специфических гумусовых веществ. Эти данные хорошо согласуются с литературными: в экспериментах по разложению растительной массы клевера в песке и в суглинке, из песка всегда извлекалось водорастворимого гумуса больше, чем из суглинистого субстрата (Мальцева, Пинский, 2022).

В рассматриваемом нами эксперименте с течением времени (от 3 до 720 суток) наблюдалось интенсивное накопление новообразованных гумусовых веществ, которое фиксировали по количеству ГК, извлекаемых разными экстрагентами – водой и раствором пирогосфата натрия. Особенно отчетливо этот процесс фиксируется на ранних стадиях инкубации (до 180 суток). В то же время интенсивность накопления ГК, описываемая стандартной моделью насыщения (табл. 1), со временем снижалась.

Таблица 1

Параметры модели номер 1, характеризующей возрастание содержания С_{ГК}, мг/100 г, в период 3–720 суток после закладки опыта

Параметры*	Среда/экстрагент			
	песок/вода	песок/Na ₄ P ₂ O ₇	почва/вода	почва/ Na ₄ P ₂ O ₇
R	0,860	0,930	0,942	0,924
C ₀	185 ± 98	94 ± 17	1,26 ± 2,8	416 ± 90
bt	0,63 ± 0,26	0,17 ± 0,05	0,62 ± 0,006	0,84 ± 0,24

Примечание.

*R – коэффициент корреляции (накопления С_{ГК} во времени); C₀ – содержание С_{ГК} в субстрате в начальный период времени, мг/100 г; bt – скорость увеличения С_{ГК} в субстрате, мг/100 г·сут.⁻¹. Представлены (здесь и в табл. 2) среднее значение и стандартное отклонение (M ± s).

Важно отметить следующее: в процессе трансформации органического вещества, как в инертной, так и в почвенной среде наблюдалось накопление специфических гумусовых веществ – гуминовых кислот, которые извлекались как щелочными, так и водными экстрагентами. Причем, как видно на рис. 1, водой экстрагировалось значительно большее их количество из песка (до 603 мг С_{ГК} на 100 г сухого вещества), чем из почвы – всего 18 мг С_{ГК}.

Проведя оценку представленных результатов с помощью математических моделей, можно выделить особенности трансформационных преобразований органического вещества в специфические гуминовые соединения. На начальных этапах трансформации органического вещества динамика экстракции ГК хорошо аппроксимируется линейным трендом (рис. 1) и формулой:

$$C(t) = C_0 + bt,$$

где $C(t)$ – содержание $C_{ГК}$ в субстрате на момент времени t , C_0 – содержание $C_{ГК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г, bt – скорость возрастания содержания $C_{ГК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.⁻¹.

Известно, что трансформация растительных остатков в гумус во времени чаще описывается нелинейными моделями, охватывающими сложные режимы поведения биокосных систем за пределами равновесия (Бондаренко и др., 1985; Ионенко и др., 1986; Полуэктов и др., 1980; Моделирование динамики ..., 2001).

Логика использования линейной функции обусловлена целесообразностью с максимально возможной простотой продемонстрировать изменение исходного органического материала в специфические соединения гумуса – гуминовые кислоты, где приращение функции (процесс гумификации) всегда пропорционально приращению аргумента (нарастанию содержания ГК). Для этой цели и были выбраны модели с различными временными интервалами, позволяющими получить значимые функции с высоким уровнем достоверности (рис. 1 и 2). Последнее с математической достоверностью доказывает особенность формирования специфических гумусовых веществ – гуминовых кислот – из исходного органического субстрата. При этом для исходного состояния гумифицирующегося материала вполне возможно употребить термин «континуум». Это очевидно, поскольку исходными гумусообразователями могут быть разнообразные по своему составу остатки растений (корни, листья, стебли и т.д.), а также органические и органо-минеральные субстраты на основе растительных остатков, представляющие собой, по сути, неоднородную смесь различных органических компонентов. Здесь важно выделить не то, какие по разнообразию компоненты присутствуют в «континууме», а то, что их объединяет, что в них общего. Общим для всех по разнообразию наземных растительных остатков является наличие в них сополимеризованных фенольных фрагментов, входящих в скелетную структуру лигнина, в том числе даже его негидролизующих соединений (Комаров, 2003, 2006; Ковалев, 2016; Komarov, 2005).

Скорость накопления гуминовых кислот при использовании различных растворителей является важным показателем особенностей гумусообразования в разных субстратах. Так, скорость накопления ГК в песке и в почве при экстрагировании их водой была практически одинаковой: 0,62–0,63 мг/100 г·сут.⁻¹ (рис. 1 а, в). Однако при экстракции пирофосфатом натрия скорости накопления ГК в песке и почве существенно различались: от 0,17 мг/100 г·сут.⁻¹ в песке до 0,84 мг/100 г·сут.⁻¹ в почве (рис. 1 б, г).

Таким образом, экстракция гуминовых кислот, как щелочным агентом, позволяющим извлечь из субстрата с большей сорбционной емкостью (легкосуглинистая почва) большее количество ГК, чем из песка, так и дистиллированной водой, неспособной кардинально изменять нативную суть гумуса и в силу этого экстрагирующей одинаковое количество ГК из разных субстратов, доказывает специфическую природу гумуса и его действующего начала – гуминовых кислот. А сам метод фракционирования гумуса на группы и фракции по отношению к растворителям и по силе связи с минеральной частью почвы, предложенный И.В. Тюриным (1937), в различных его модификациях (Пономарева, Плотникова (1968), Кононова, Бельчикова (1968), Александрова (1970) и др.) до сих пор не утратил как экологического основания, так и значения для фундаментальных исследований в химии и биохимии почв.

Сложность выделения и идентификации ГК из почв состоит в том, что это не инертный, а постоянно изменяющийся неоднородный по химическому, физическому, биологическому и иному составу природный компонент. Поэтому выделенные из почвы с помощью различных реагентов гумусовые компоненты (под которыми в данном случае мы имеем в виду гуминовые кислоты и фульвокислоты) не имеют четко заданного состава и в каждый конкретный момент действительно отличаются от изначального состояния. Кроме того, гумусовые вещества, образовавшиеся в почве, постоянно трансформируются в почвенной среде, вступая во взаимодействие с минеральной частью почвы, различными промежуточными продуктами минерализации растительных и животных остатков,

образуя разнообразные органоминеральные производные. Эксперименты показали, что из почвы дистиллированной водой ГК в значимых количествах начинают извлекаться только на 180 сутки (всего 10 мг С), в то время как пирофосфатом натрия к этому времени их извлекается почти в 70 раз больше (рис. 1 в, г). Из инертного песчаного субстрата, напротив, вода извлекает значительно больше ГК, чем щелочной экстрагент. Все это указывает не только на специфику извлечения ГК с помощью различных реагентов из разных сред, но и на особенность их взаимодействия с минеральной основой почвы, в ходе которого формируются органоминеральные комплексы и происходит закрепление гумусовых кислот почвенной минеральной матрицей.

Поскольку новообразованные гумусовые вещества формируются уже на ранних стадиях процесса гумусообразования, в тех же условиях модельных лабораторных опытов при оптимальной влажности и температуре на 3, 7, 17 и 30 день оценивалась динамика их накопления в почвенной среде (дерново-подзолистая легкосуглинистая почва) и инертной среде (кварцевый песок). В качестве исходного гумусообразователя использовалась наземная масса клевера. Установлено, что при инкубации растительных остатков в инертной среде дистиллированной водой извлекалось значительно больше как гуминовых кислот, так и фульвокислот, чем при экстракции их пирофосфатом натрия (рис. 2, табл. 2). Данный факт Л.Н. Александрова (1970) объясняла тем, что при гумификации растительных остатков в песке новообразованные гумусовые кислоты длительное время остаются растворимыми в воде и после экстракции легко разделяются при действии кислоты на осаждаемую ($C_{ГК}$) и неосаждаемую ($C_{ФК}$) группы. Этот опыт показывает, что при гумификации растительных остатков уже на начальных стадиях процесса также образуются специфические гумусовые вещества, включая как гуминовые кислоты, так и фульвокислоты, извлекаемые, как 0,1 М раствором пирофосфата натрия, так и водой.

Таблица 2

Параметры модели 2, характеризующей возрастание содержания гуминовых кислот и фульвокислот, мг/100 г в период 3–30 суток после закладки опыта

Параметры*	ГВ/экстрагент			
	ГК/вода	ФК/вода	ГК/ $Na_4P_2O_7$	ФК/ $Na_4P_2O_7$
R	0,995	0,925	0,926	0,892
C_0	4 ± 19	293 ± 73	78 ± 29	176 ± 26
bt	17 ± 1	15 ± 4	6 ± 2	4 ± 2

Примечание.

*R – коэффициент корреляции (накопления $C_{ГК}$ и $C_{ФК}$ во времени); C_0 – содержание $C_{ГК}$ или $C_{ФК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г; bt – скорость возрастания содержания $C_{ГК}$ или $C_{ФК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.⁻¹.

Модель, описывающая процесс трансформации органического вещества в инертном субстрате (рис. 2), демонстрирует особенность накопления фракций гуминовых кислот и фульвокислот. Причем, скорость накопления как гуминовых кислот, так и фульвокислот при извлечении их водой примерно одинакова и составляла 17 и 15 мг/100 г·сут.⁻¹. Показательно, что при извлечении гумусовых веществ с помощью $Na_4P_2O_7$ скорость накопления ГК составила всего 6 мг/100 г·сут.⁻¹, а ФК – 4 мг/100 г·сут.⁻¹, что было значительно (в 4 раза) меньше, чем при извлечении их водой.

При трансформации растительных остатков в почве и извлечении образующихся соединений водой практически не извлекаются гуминовые кислоты, однако хорошо извлекаются фульвокислоты. В то же время щелочная вытяжка способствует большему извлечению гуминовых кислот, а не фульвокислот (табл. 2, рис. 2). Отсюда следуют особенности формирования гумусовых соединений из органических остатков: в системе гумусовых кислот со временем появляются фракции, легко осаждающиеся при взаимодействии с обменным кальцием и переходящие в раствор только в виде гуматов натрия. По этому поводу Л.Н. Александрова (1970, с. 73) отмечала: «Если гумификация развивается в массе суглинка, богатого обменным кальцием, некоторая часть гумусовых кислот теряет растворимость в воде, но легко экстрагируется 0,1 М раствором $Na_4P_2O_7$ ».

Другая часть кислот образует растворимые в воде соли и в силу этого легко экстрагируется водой. Таким образом, способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвенной среды не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности вычленения их отдельных фракций. Так, один из

путей образования фульвокислот в почве – постепенное отщепление их от новообразованных гуминовых кислот, имеющих в силу своей "незрелости" еще очень неустойчивые молекулы, легко подвергающиеся частичной деструкции при взаимодействии с минеральной частью почвы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассуждая об особенностях формирования специфических соединений гумуса И.В. Перминова (2008) с позиций химии поясняет, что применительно к гуминовым веществам «исчезает понятие молекулы – мы можем говорить только о молекулярном ансамбле, каждый параметр которого описывается распределением». Однако по образному выражению И.В. Перминовой, этот «хаос только кажущийся», ибо «диапазон вариаций атомных отношений основных составляющих элементов (С, Н, О и N) не столь уж широк. При этом он отчетливо зависит от источника происхождения гуминовых веществ» (Перминова, 2008, с. 52). Максимальное содержание кислорода и кислородсодержащих функциональных групп наблюдается в веществах, полученных в процессе окислительно-гидролитических трансформации из воды; дальше их содержание снижается в ряду: «вода – почва – торф – уголь». В обратной последовательности увеличивается содержание ароматического углерода. По сути, ГВ являются широко распространенными в окружающей среде «самоорганизующимися природными полиэлектролитами» (Perminova, 2013, с. 735) – таково мнение химика.

Попробуем рассмотреть этот вопрос с позиций почвоведов. С одной стороны, гумус – это специфический продукт почвы, обеспечивающий её плодородие. Так, Л.Н. Александрова (1980) считала, что гумус формируется только в почве и не образуется под слоем воды (сапропель), в процессе торфообразования, углефикации и в ходе иных не почвенных процессов. Однако дальнейшие исследования показали, что гуминовые вещества широко распространены в природе, а особенности их состава и свойств позволили предположить, что они образуются также в торфах, бурых углях, сапропеле и других естественных объектах (Орлов, 1977; Попов, 2004; Перминова, 2008). Даже у почвоведов есть разные точки зрения, не говоря о позициях химиков, физиологов, растениеводов и представителей других наук. Действительно, процесс гумификации настолько сложен, что современная наука не выработала единых взглядов на его характер. Существуют несколько концепций, объясняющих образование гумуса, однако все они основываются на том, что гуминовые вещества – специфическое природное соединение.

Напомним, что в соответствии с конденсационной и полимеризационной концепциями формирование специфических ГВ рассматривается в процессе постепенной поликонденсации и полимеризации промежуточных продуктов разложения органических веществ, образующихся при первоначальной деструкции попадающих в почву органических остатков до простых мономеров (Кононова, 1963; Flaig, 1965; Kononova, 1966).

Иных взглядов на формирование гумуса придерживались И.В. Тюрин и Л.Н. Александрова, а также их ученики. Ими развивалась концепция последовательного биохимического окисления высокомолекулярных продуктов разложения органических остатков (прежде всего лигнина) в специфические гумусовые вещества. Концепция получила экспериментальное подтверждение в работе А.А. Комарова (2005). Изучение в течение пяти лет специфики формирования гумусовых веществ, образующихся в процессе многолетней трансформации органогенного субстрата (компоста на основе торфа), показало, что органическое вещество субстрата проходит три стадии трансформации: гидролиз органических продуктов → начальная трансформация → гумификация лигниновых структур (Bezuglova et al., 2022). На третьей стадии, начиная с 3 года наблюдений, отмечено резкое изменение в соотношении трех главных групп гумуса в пользу гуминовых кислот за счет уменьшения количества не до конца гумифицировавшихся на предыдущих этапах лигниновых структур, составлявших основную массу негидролиземого остатка. В полном соответствии с термодинамической теорией гумификации (Orlov, 1995) система стремится к своему динамично стабильному состоянию, происходит сополимеризация ароматических структур, уплотнение ядра гумусовых веществ, и постепенное "созревание" гумуса. В данном эксперименте разложение органического субстрата (листовой массы клевера) продолжалось только два года, но скорость трансформации была заметно выше и уже на начальных стадиях процесса были выявлены специфические гумусовые вещества, включая как гуминовые кислоты, так и фульвокислоты, извлекаемые как 0.1 М раствором пирогенфосфата натрия, так и водой.

Есть и другие гипотезы формирования гумуса, например, биологические концепции гумусообразования (В.Р. Вильямс, Ф.Ю. Гельцер, Д.Г. Звягинцев и др.), которые рассматривают ГВ как продукты жизнедеятельности микроорганизмов. Однако они не имеют до сих пор

экспериментального подтверждения, прежде всего потому, что основа ароматического ядра гумуса – сополимеризованные фенолы – могут быть продуктами лишь растений, формирующих особые растительные полимеры на основе лигнина.

Вероятно, данная работа, как и исследования, проведенные авторами привлеченных публикационных материалов, не поставят окончательную точку в дискутируемой теме. Вместе с тем, разностороннее обсуждение проблемы гумусообразования как с позиций супрамолекулярной химии, так и с привлечением классических методов исследований и математического моделирования всегда будет актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изучения процессов гумусообразования в инертной и почвенной средах экспериментально выявлена зависимость количества образующихся в процессе трансформации растительных остатков гумусовых кислот от минералогического (и химического) состава среды. В инертной среде формирующаяся система гумусовых веществ характеризуется высокой растворимостью в воде и после экстракции легко расщелачивается при действии кислоты на осаждаемую ($C_{ГК}$) и не осаждаемую ($C_{ФК}$) части. В системе гумусовых веществ, образующихся в почве, часть кислот связывается с минеральной матрицей и, прежде всего, кальцием, теряя способность к растворению в воде, но извлекается из почвы щелочной экстракцией. Таким образом, способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвенной среды не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности выделения их отдельных групп. При этом общим является то, что динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органического вещества хорошо аппроксимируется простой линейной моделью. Установлено, что на ранних этапах трансформации органического вещества скорость возрастания содержания гуминовых кислот и фульвокислот практически одинакова в разных средах.

ЛИТЕРАТУРА

- Александрова Л.Н. Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. Ленинград, Пушкин, 1970. Том 142. С. 142–234.
- Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Ленинград, 1980. 287 с.
- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: МГУ, 1970. 244 с.
- Бондаренко Н.Ф., Журавлев О.С., Швытов И.А. Моделирование трансформации органических веществ в почвах // Моделирование биогеоценотических процессов. Москва: Наука, 1985. С.136–141.
- Вацадзе С.З., Максимов А.Л., Бухтияров В.И. Супрамолекулярные эффекты и системы в катализе. Обзор // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2022. Том 502. С. 3–31. <https://doi.org/10.31857/S2686953522010101>
- Витковская С.Е. Закономерности динамики выноса питательных веществ растениями ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 5. С. 38–45.
- Витковская С.Е. Распределение макро- и микроэлементов системе почва – растение в зависимости от видовых особенностей вики (*ViciaSativa*) и овса (*AvenaSativa*) // Агрохимия. 2016. № 1. С. 27–37.
- Дергачева М.И. Органическое вещество почв: статика и динамика (на примере Западной Сибири). Новосибирск, 1984. 152 с.
- Дергачева М.И. Традиции и новаторство в Учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e172. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>
- Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Методика определения удельных скоростей роста растений и выноса ими химических элементов из почвы. Методические рекомендации. Санкт-Петербург: АФИ, 2011. 24 с.
- Ионенко В.И., Бацула А.А., Головачев Е.А. О кинетике процесса гумификации // Почвоведение. 1986. № 2. С. 25–33.
- Касаточкин В.И. О строении карбонизованных веществ // Известия АН СССР. Отдел технических наук. 1953. № 10. С. 1401–1406.
- Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах: Диссертация ... д. с.-х. наук. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 398 с.

- Комаров А.А. Особенность минерализации гидролизного лигнина в условиях различных фитоценозов // Агрохимия. 2003. № 12. С. 5–13.
- Комаров А.А. Моделирование процесса трансформации гидролизного лигнина и выделение лигно-гуминовых кислот // Почвоведение. 2005. № 6. С. 664–671.
- Комаров А.А. Экспериментальное подтверждение справедливости гипотезы гумификации Л.Н. Александровой путем модельных экспериментов // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию кафедры почвоведения имени Л.Н. Александровой, 2006. С. 54–55.
- Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
- Кононова М.М., Бельчикова Н.П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. 1961. № 10. С. 75–87.
- Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд. РАН, 1998. 333 с. (Перевод с английского: Lehn J.-M. Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives. Weinheim, 1995).
- Люжин М.Ф. Минерализация и гумификация растительных остатков в почве: Автореферат диссертации ... канд. с.-х. наук. Ленинград-Пушкин, 1968. 24 с.
- Мальцева А.Н. Пинский Д.Л. Влияние минеральной среды на динамику органического вещества в процессе разложения растительных остатков в модельном эксперименте // Экология родного края: проблемы и пути их решения. Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Книга 1. Киров, 2022. С. 399–402.
- Мистерски В., Логинов В. Исследование некоторых физико-химических свойств гуминовых кислот // Почвоведение. 1959. № 2. С. С. 39–51.
- Моделирование динамики органического вещества почв / А.В. Смагин, Н.Б. Садовникова, М.В. Смагина и др. Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом (типография), 2001. 120 с.
- Орлов Д.С. Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гуминовых кислот // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. 1977. № 9. С. 5–16.
- Орлов Д.С. Химия почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 401 с.
- Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. 2008. № 1. С.50–55.
- Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов А.А. Динамические модели экологических систем. Ленинград: Гидрометеоздат, 1980. 288 с.
- Пономарева В.В. Плотникова И.А. Методика и некоторые результаты фракционирования гумуса черноземов // Почвоведение. 1968. № 11. С. 104–117.
- Тюрин И.В. Органическое вещество и его роль в почвообразовании и плодородии. Москва, Ленинград: Сельхозгиз, 1937. 287 с.
- Федотов Г.Н., Шоба С.А. О природе гумусовых веществ // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1424–1432. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15120060>
- Baalousha M., Motelica-Heino M., Galaup S., Le Coustumer P. Supramolecular structure of humic acids by TEM with improved sample preparation and staining // Microscopy Research and Technique. 2005. Vol. 66. No. 6. P. 299–306. <https://doi.org/10.1002/jemt.20173>
- Bezuglova O., Komarov A., Komarov A. Identification of humic substances on the transformation of an organic substrate // Eurasian Journal of Soil Science. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 10–16. <https://doi.org/10.18393/EJSS.974224>
- Bezuglova O. Molecular structure of humus acids in soils // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2019. Vol. 182. No. 4. P. 676–682. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900043>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.
- Flaig W. Effect of lignin degradation products on plant growth // Isotopes and radiation in soil plant nutrition studies. Intern. atomicenergyagency. Vienna, 1965. P. 3–19.
- Kleinhempel D. Ein Beitrag zur Theorie des Huminstoffzustandes // Archives of Agronomy and Soil Science. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1080/03650347009412655>

- Kononova M.M. Soil Organic Matter. Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. 2nd Edition. Published by Pergamon Press, 1966. 544 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05430-8>
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. Vol. 528. P. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Orlov D.S. Soil Chemistry. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1992. 390 p.
- Orlov D.S. Humic Substances of Soils and General Theory of Humification. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1995. 323 p.
- Perminova I.V. Humic substances-assisted synthesis of nanoparticles in nature and in the lab. Conference paper: Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment. J. Xu, J. Wu, Y. He (eds.): Springer, Dordrecht, 2013. P. 735–740. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2_133
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances // Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science // Advances in Agronomy. 2002. Vol. 75. P. 57–134. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7)
- Piccolo A. In memoriam Prof. F.J. Stevenson and the Question of humic substances in soil // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2016. Vol. 3. Article number 23. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2>
- Schnitzer M. Soil organic matter – the next 75 years // Soil Science. 1991. Vol. 151(1). P. 41–58.
- Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley-Inter-Science, New York, 1994. 438 p.

Поступила в редакцию 27.03.2025

Принята 22.04.2025

Опубликована 07.05.2025

Сведения об авторах:

Комаров Андрей Алексеевич – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», зав. сектором агромониторинга (г. Санкт-Петербург, Россия); Zelenydar@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1430-0509>.

Безуглова Ольга Степановна – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия); lola314@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Humus formation as a process of plant residues transformation

© 2025 A. A. Komarov ¹, O. S. Bezuglova ²

¹Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy pr., 14, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: Zelenydar@mail.ru

²Southern Federal University, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: lola314@mail.ru

The study aims to confirm the specificity of humic acids extracted from various substrates with different extractants, by applying mathematical models.

Methods. The article analyses some classical methods used for isolating humic acids during the plant residues transformation; the methods were assessed by mathematical modeling. Such interdisciplinary approach, i.e. combining soil organic matter biochemistry and mathematical modeling, helped establishing an evidence base for humus specificity. Using up-to-date OriginPro software for data analysis and high-quality visualization, the study analyzes earlier published results of the experiments investigating the decomposition of plant residues as primary humus precursors. Model experiments examining the humification of plant residues (clover leaf biomass) were conducted under controlled conditions in sod-podzolic light loamy soil and quartz sand. Humic substances were extracted using distilled water and 0.1 M sodium pyrophosphate solution. Humus carbon content was determined by the wet combustion method with titrimetric determination.

Results. The study provided experimental evidence of humic substances specificity, based on the differences in their extraction from soils by various extractants, and modeled mathematically. The nature of humus is discussed

from the perspectives of soil biochemistry and mathematical modeling of plant residue transformation into specific humic compounds. It was shown that, in both soil and inert media, the early-stage dynamics of humic compound formation was well approximated by a simple linear trend. Moreover, the accumulation rates of humic and fulvic acids were nearly identical across environments. As the mass of the organic substrate decreased, the transformation process transitioned to a saturation phase.

Conclusions. Experimental data revealed that the amount of humic acids formed during plant residues transformation depended on the mineralogical and chemical composition of the medium. It was demonstrated that using different extractants to extract humic substances from soil and inert media (quartz sand) not only supported the notion of the existence of specific humic compounds, but also highlights the distinct formation pathways of their individual groups. Notably, there was revealed a shared feature across environments, i.e. that the humic compounds formation during organic matter transformation was well approximated by a simple linear model. It was found that at early transformation stages the rates of increase in humic and fulvic acid content were almost identical in both soil and inert media.

Keywords: humus; humic acids; fulvic acids; sod-podzolic soil; quartz sand; plant residues; humus formation.

How to cite: Komarov A.A., Bezuglova O.S. Humus formation as a process of plant residues transformation. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e307. DOI: [10.31251/pos.v8i1.307](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.307) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Aleksandrova L.N. Humic substances of the soil (their formation, composition, properties and significance in soil formation and fertility). Notes of the Leningrad Agricultural Institute. Leningrad, Pushkin, 1970. Vol. 142. P. 142–234. (in Russian).
- Aleksandrova L.N. Soil organic matter and its transformation processes. Leningrad, 1980. 287 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Handbook of chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University, 1970. 244 p. (in Russian).
- Bondarenko N.F., Zhuravlev O.S., Shvytov I.A. Modeling the transformation of organic matter in soils. In book: Modeling of biogeocenotic processes. Moscow: Nauka Publ., 1985. P. 136–141. (in Russian).
- Vatsadze S.Z., Maximov A.L., Bukhtiyarov V.I. Supramolecular effects and systems in catalysis. Doklady Chemistry. 2022. Vol. 502. No. 1. P. 1–27. <https://doi.org/10.1134/S0012500822010013>
- Vitkovskaya S.E. Dynamic laws of the nutrient removal by barley plants in the field experiment. Agrohimiya. 2015. No. 5. P. 38–45. (in Russian).
- Vitkovskaya S.E. The distribution of macro- and microelements in soil-plant system according specific features of vetch (*Vicia Sativa*) and oats (*Avena Sativa*). Agrohimiya. 2016. No. 1. P. 27–37. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Soil organic matter: statics and dynamics (using Western Siberia as an example). Novosibirsk, 1984. 152 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. Traditions and innovation in the Doctrine of soil humus. The Journal of Soils and Environment. 2021. Vol. 4. No. 4. e172. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>
- Drichko V.F., Izosimova A.A. Methodology for determining specific plant growth rates and their removal of chemical elements from the soil. Methodical recommendations. St. Petersburg: AFI, 2011. 24 p. (in Russian).
- Ionenko V.I., Batsula A.A., Golovachev E.A. On the kinetics of the humification process. Pochvovedenie. 1986. No. 2. P. 25–33. (in Russian).
- Kasatochkin V.I. On the structure of carbonized substances. Izvestiya AN SSSR. Department of Technical Sciences. 1953. No. 10. P. 1401–1406. (in Russian).
- Kovalev I.V. Biochemistry of lignin in soils: Dissertation ... Dr. of Agricultural Sci. Moscow: Dokuchaev Soil Institute, 2016. 398 p. (in Russian).
- Komarov A.A. Mineralization of hydrolytic lignin in different agroecological conditions. Agrohimiya. 2003. No. 12. P. 5–13. (in Russian).
- Komarov A.A. Simulation of hydrolytic lignin transformation and the isolation of lignohumic acids. Eurasian Soil Science. 2005. Vol. 38. No. 6. P. 586–592.
- Komarov A.A. Experimental confirmation of the validity of L.N. Alexandrova's humification hypothesis by model experiments. Proceedings of the All-Russian scientific conf. dedicated to the 100th anniversary of the L.N. Alexandrova Soil Science Department, 2006. P. 54–55. (in Russian).
- Kononova M.M. Soil organic matter. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 314 p. (in Russian).

- Kononova M.M., Belchikova N.P. Accelerated methods for determining the humus composition of mineral soils. *Pochvovedenie*. 1961. No. 10. P. 75–87. (in Russian).
- Lehn J.-M. *Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Enterprise of the Russian Academy of Sciences, 1998. 334 p. (Translated from English: Lehn J.-M. *Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives*. Weinheim, 1995).
- Lyuzhin M.F. Mineralization and humification of plant residues in the soil: Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Leningrad-Pushkin, 1968. 24 p. (in Russian).
- Maltseva A.N. Pinsky D.L. Influence of the mineral environment on the dynamics of organic matter during the decomposition of plant residues in a model experiment. In book: *Ecology of the native land: problems and ways to solve them. Proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conference with international participation Book 1*. Kirov, 2022. P. 399–402. (in Russian).
- Mistersky V., Loginov V. The study of some physical and chemical properties of humic acids. *Pochvovedenie*. 1959. No. 2. P. 39–51. (in Russian).
- Modeling of the dynamics of organic matter in soils / AV., N.B. Sadovnikova, M.V. Smagina et al. Moscow: Moscow State University Press, 2001. 120 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Kinetic theory of humification and a scheme of the probable structure of humic acids. *Nauchnyye Doklady Vyshey Shkoly. Biologicheskoye Nauki*. 1977. No. 9. P. 5–16. (in Russian).
- Orlov D.S. *Soil chemistry*. Moscow: Publishing house of Moscow University, 1992. 401 p. (in Russian).
- Perminova I.V. Humic substances – a challenge to chemists of the 21st century. *Khimiya i zhizn'*. 2008. No. 1. P. 50–55. (in Russian).
- Poluektov R.A., Pykh Yu.A., Shvytov A.A. *Dynamic models of ecological systems*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 288 p. (in Russian).
- Ponomareva V.V., Plotnikova I.A. Methodology and some results of fractionation of humus of chernozems. *Pochvovedenie*. 1968. No. 11. P. 104–117. (in Russian).
- Tyurin I.V. *Organic matter and its role in soil formation and fertility*. Moscow, Leningrad: Selkhozgiz Publ., 1937. 287 p. (in Russian).
- Fedotov G.N., Shoba S.A. On the nature of humic substances. *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 12. P. 1292–1299. <https://doi.org/10.1134/S1064229315120066>
- Baalousha M., Motelica-Heino M., Galaup S., Le Coustumer P. Supramolecular structure of humic acids by TEM with improved sample preparation and staining. *Microscopy Research and Technique*. 2005. Vol. 66. No. 6. P. 299–306. <https://doi.org/10.1002/jemt.20173>
- Bezuglova O., Komarov A., Komarov A. Identification of humic substances on the transformation of an organic substrate. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 10–16. <https://doi.org/10.18393/EJSS.974224>
- Bezuglova O. Molecular structure of humus acids in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2019. Vol. 182. No. 4. P. 676–682. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900043>
- IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.
- Flaig W. Effect of lignin degradation products on plant growth. Isotopes and radiation in soil plant nutrition studies. Intern. atomic energy agency. Vienna, 1965. P. 3–19.
- Kleinhempel D. Ein Beitrag zur Theorie des Huminstoffzustandes. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1080/03650347009412655>
- Kononova M.M. *Soil Organic Matter. Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility*. 2nd Edition. Published by Pergamon Press, 1966. 544 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05430-8>
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Orlov D.S. *Soil Chemistry*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1992. 390 p.
- Orlov D.S. *Humic Substances of Soils and General Theory of Humification*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1995. 323 p.

- Perminova I.V. Humic substances-assisted synthesis of nanoparticles in nature and in the lab. Conference paper: Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment. J. Xu, J. Wu, Y. He (eds.): Springer, Dordrecht, 2013. P. 735–740. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2_133
- Piccolo A. In memoriam Prof. F.J. Stevenson and the Question of humic substances in soil. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2016. Vol. 3. Article number 23. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2>
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. Advances in Agronomy. 2002. Vol. 75. P. 57–134. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7)
- Schnitzer M. Soil organic matter – the next 75 years. Soil Science. 1991. Vol. 151(1). P. 41–58.
- Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley-Inter-Science, New York, 1994. 438 p.

Received 27 March 2025

Accepted 22 April 2025

Published 07 May 2025

About the authors:

Andrey A. Komarov – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, Agrophysical Research Institute, Head of Agricultural Monitoring Sector (St. Petersburg, Russia); Zelenydar@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1430-0509>.

Olga S. Bezuglova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment of the Laboratory of Agrochemistry, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); lola314@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>.

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)