



ТРАДИЦИИ И НОВАТОРСТВО В УЧЕНИИ О ГУМУСЕ ПОЧВ

© 2021 М. И. Дергачева

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева,
8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: dergacheva@issa-siberia.ru

Цель работы. Настоящая статья не претендует на полный обзор проблем, имеющих в настоящее время в Учении о гумусе почв и отражающихся в многочисленных публикациях, а ставит своей целью изложить авторское видение ряда аспектов, касающихся возможностей сочетания традиций и новаторства – одного из общенаучных методологических приемов – в развитии этого научного направления.

Методология. Рассматривается развитие и современное состояние двух направлений в изучении гумусовых веществ почв – химического и экологического. Подчеркивается, что в рамках химического направления, для доказательства специфичности химической структуры гумусовых веществ как самостоятельной группы природных углеродистых соединений, требуется поиск новых (дополнительных) приемов и методов. На данном этапе исследований наиболее перспективным выглядит рассмотрение механизма формирования гумусовых веществ с позиций супрамолекулярной химии. Методологической основой интерпретации материалов исследования в разделе, посвященном экологическому направлению, являются системный подход и теоретические положения экологии почв.

Предлагается при решении проблем в рамках экологического направления сохранить традиционные понятия терминов, в том числе и термина гумус, в рамках химического направления – уточнить понятийные объемы некоторых терминов, используемых при решении проблем, связанных с механизмом формирования системы гумусовых веществ, их химической структуры и свойств как природных веществ особого специфичного класса химических соединений. В настоящей статье при рассмотрении вопросов, связанных с пониманием совокупности гумусовых веществ как системы, термины гумус и система гумусовых веществ используются как синонимы.

Основные результаты и заключение. Предлагается рассматривать гумус и гумусовые вещества с позиций разных направлений, выделенных в Учении о гумусе почв. В рамках химического направления этот почвенный компонент может рассматриваться как субстанция и как природная открытая система. В первом случае, гумус и гумусовые вещества изучаются на основе редукционистского подхода и интерпретируются на основе законов, принципов и правил традиционных химических направлений, в том числе химии природных соединений и химии полимеров. Прослежено возникновение на разных этапах развития Учения о гумусе почв от истоков до современного времени фактов, положений, выводов, которые до сих пор не потеряли своей значимости и могут относиться к традиционным. Парадигма XX в., которая до сих пор не вытеснена другими концепциями, является господствующей и в современное время. Эта парадигма, относящая гумусовые вещества с устойчивой структурной организацией к углеродистым соединениям с переменным составом, считается традиционной. Рассмотрение совокупности гумусовых веществ как сложной природной самоорганизующейся и саморегулируемой системы требует других подходов к изучению и интерпретации получаемых материалов. Они должны быть основаны на системном подходе, предопределяющем сравнение монофакторных рядов, в каждом из которых объекты исследования отличаются только каким-то одним условием, свойством, химической структурой или функцией. Необходимо продолжить изучение влияния щелочного экстрагирования на состояние гумусовых кислот, уже применяемыми ранее и новыми методами, используя как можно более широкое разнообразие монофакторных рядов почв разнообразных естественных и антропогенных условий формирования, а когда накопится критический уровень материалов, можно будет сделать однозначный вывод и определить те условия, при которых щелочное экстрагирование должно исключаться.

Ключевые слова: гумус; гуминовые кислоты; система гумусовых веществ; химическое направление; экологическое направление; традиционные понятия и методы; новые подходы и методы

Цитирование: Дергачева М.И. Традиции и новаторство в Учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e172. doi: [10.31251/pos.v4i4.172](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172)

ВВЕДЕНИЕ

История Учения о гумусе почв, которая насчитывает уже около 250 лет, в течение всего периода характеризовалась появлением кардинально противоположных точек зрения на существование в природе специфических углеродистых соединений – гумусовых веществ (ГВ): от признания их в качестве особых природных соединений, не имеющих аналогов, до полного отрицания их существования. Дискуссии по вопросам реальности существования, нативности

выделяемых из почв гумусовых веществ, причин накопления и сохранения их в почвах, специфичности как природных веществ почвенного происхождения время от времени сильно обострялись, когда некоторые исследователи были не в состоянии принять и понять их необычность. Гумусовые вещества не укладывались в привычные рамки химических, биологических, физических, геологических представлений и все попытки объяснения тех или иных связанных с гумусом или гумусовыми веществами вопросов не приводили к появлению их однозначных решений, а скорее порождали накопление противоречий во взглядах на их происхождение, природу, строение и свойства.

Дискуссионное состояние Учения о гумусе почв вновь обострилось в последние десятилетия, начиная с конца XX в., а особенно после выхода в свет статьи Лехмана и Клебера (Lehmann, Kleber, 2015). В этой работе было предложено рассматривать гумус как континуум продуктов разложения органических веществ на разной стадии этого процесса, запретить употребление термина гумус и считать артефактами изучаемые гумусовые вещества, выделяемые при щелочном экстрагировании и разделении на гуминовые кислоты и фульвокислоты при подкислении растворов до самых низких значений pH. Точка зрения этих авторов вызвала только усиление противостояния исследователей, поддерживающих признание существования специфических почвенных веществ, что привело к увеличению интенсивности и разнообразию исследований в этой области знаний, как научного, так и прикладного значения.

Природные вещества, которые впервые выделил в 1786 году Ахард (Achard, 1786, цит. по: История учений о перегное, 1940), определив начало непрекращающегося повышенного к ним интереса, практически всегда находились в области борьбы разных подходов, понимания их сущности, методических и методологических разногласий. Но, несмотря на смену господствующих в определенные периоды представлений о гумусе и гумусовых веществах, понимания их сущности и природы, подходов и методов их изучения, попыток объяснения различных феноменов в области изучения этих своеобразных природных углеродистых веществ, периодически появляющихся идей, отрицающих сам факт самостоятельности существования этих природных образований, а также терминологические трудности, постепенно накопились факты и сведения об этом компоненте почв как об особых природных углеродистых соединениях, играющих существенную роль в разных почвенных процессах. Появление и развитие новых естественнонаучных направлений, новых методов и приемов изучения этих природных образований, способствовало расширению понимания важной роли гумуса в целом и отдельных составных его компонентов в природных процессах. Менялись методология познания, методические подходы к выделению и исследованию их строения, состава и роли в природных процессах, принципы интерпретации материалов исследования, что порождало некоторую трансформацию самого понимания сущности гумуса и его компонентов, приводивших к смене парадигм – совокупности фундаментальных научных установок, представлений и терминов, господствующих в течение определенного исторического периода в научном сообществе.

Так, в XVIII в. и большую часть XIX в. преобладало представление о перегное (гумусе) как о простых химически индивидуальных соединениях; в последней трети XIX в. стал обсуждаться и распространяться взгляд на образование гумуса как продукта, получающегося в *результате сочетания двух природных процессов: разложения разных растительных остатков или их смеси и синтеза сложных по своей природе гумусовых веществ*. Но господствующее положение взгляды на гумусовые вещества как на *реально существующие природные образования, представляющие собой продукт двухфазного процесса (разложения и синтеза) и образующиеся в процессе конденсации (полимеризации) ароматических соединений с азотсодержащими органическими молекулами* заняли позднее – в первой половине XX в.

Во второй половине XX в., особенно последней его четверти, стало преобладать понимание *гумусовых веществ как особых природных углеродистых соединений с переменным составом*. В XXI веке пока ни одна из концепций не стала общепринятой, а господствующее положение в системе взглядов на гумус и гумусовые вещества до сих пор занимают взгляды, очень хорошо описанные в фундаментальных монографиях Д.С. Орлова (1974; 1990) и Ф. Стивенсона (Stevenson, 1982; 1994).

Однако, как выяснилось при анализе публикаций и систематизации взглядов на гумус и гумусовые вещества, кроме химических вопросов, касающихся механизмов их образования, состава, структуры и свойств как природных веществ, от самых истоков изучения (и даже раньше) ученых интересовали вопросы другой направленности: каковы *причины* формирования этих

веществ и их отличий от уже известных соединений, встречающихся в почвах; какую роль они играют в природных процессах, то есть, по сути, какие функции они выполняют в почвах. В настоящий период развития экологии почв эти вопросы входят в ее компетенцию. По этим причинам было принято решение выделить в Учении о гумусе почв кроме химического направления, еще и экологическое направление, для которого проследить истоки возникновения, появления фактов и выводов, историю развития взглядов.

Несмотря на эволюцию взглядов о гумусе и гумусовых веществах, на каждом этапе развития Учения о гумусе почв появлялись факты и выводы, которые внесли существенный вклад в формирование современных представлений о природе и химическом состоянии этих своеобразных природных углеродистых соединений, не потерявших свою актуальность и в настоящее время.

Рассмотрим эти два направления в развитии Учения о гумусе почв.

1. ХИМИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В УЧЕНИИ О ГУМУСЕ ПОЧВ

1.1. Взгляды, факты, выводы, относимые к категории традиционных. Обратим внимание на установленные факты и/или сделанные исследователями выводы, которые просуществовали очень длительное время, дав импульс к развитию разных положений Учения о гумусе почв, до сих пор не потерявшие свою значимость, то есть перешедшие в категорию традиционных.

Впервые выявлено, что гумус представляет собой не однородное вещество, а смесь разных веществ, которые могут быть легко разделены; он образуется из мертвых растений под влиянием воздуха и влаги, *богаче углеродом и беднее водородом и кислородом по сравнению с исходными растительными остатками* (Saussure, 1804, цит. по: История учений о перегное, 1940).

Сформулировано положение, что гумус *«представляет собою очень сложное тело, составные части которого зависят от состава растений и животных, участвующих в его образовании»* (Sprengel, 1837).

Впервые *предложен и описан метод выделения и количественного определения гуминовой кислоты* (Sprengel, 1826; 1837).

Установлена *кислотная природа гуминовых веществ*, выявлены их свойства и свойства их солей (*гуматов*), определена *растворимость в воде* (Sprengel, 1837).

Введено понятие *«гумусовый уголь»* и установлено, что *почва более плодородна там, где гумус растворим в большей степени и в нем меньше «гумусового угля»* (Sprengel, 1837).

Выявлено *присутствие в гумусе креновой и апокреновой кислот* (Berzelius, 1833; 1839, цит. по: История учений о перегное, 1940) и предложен *термин «фульвокислоты»*, их объединяющий (Oden, 1919).

Установлено, что *азот не является примесью, а представляет собой конституционный элемент гумусовых веществ* (Герман, 1836; 1837).

Впервые обосновано *различие между понятиями гуминовые вещества и гуминовые кислоты (ГК)*, применено для изучения гуминовых кислот *потенциометрическое титрование*, объяснена кислотная природа почвенного гумуса наличием водородных ионов, отдиссоциируемых гуминовыми кислотам (Oden, 1912).

Впервые на основе разносторонних исследований сделан вывод, что гуминовые кислоты представляют собой не индивидуальные химические соединения, а *группу соединений с переменным составом, обладающих общими чертами строения* (Шмук, 1930).

Впервые экспериментально доказана *ароматическая природа гуминовых кислот, наличие в них бензольного ядра* (главным источником которого считался лигнин), *функциональных (карбоксильных и гидроксильных) групп, органических азотсодержащих соединений микробного происхождения* (Шмук, 1924; 1930).

Впервые сформулировано представление о *гуминовых кислотах как о высокодисперсных суспензиях* (Шмук, 1930).

Высказана *гипотеза*, развивавшаяся в течение большей части XX в., *об образовании темноокрашенных сложных продуктов – гумусовых веществ*, в основе которого лежит превращение ароматических соединений через окисление их ферментами микроорганизмов до хинонов с дальнейшей конденсацией последних (Трусов, 1914; 1916).

Показана *реальность существования гумусовых веществ с использованием лизиметрического метода* (Вильямс, 1904, цит. по: Вильямс, 1914).

Высказана идея о существенной роли в формировании гумуса лигнино-протеинового комплекса (Ваксман, 1937).

Предложена *система оригинальных взглядов на состав, процессы превращения органических остатков в почвах и их роль в почвообразовании и плодородии*, а также новые идеи, взгляды на химические свойства, природу и реальность существования гумусовых веществ (Тюрин, 1937). Работы И.В. Тюрина на долгие годы определили направление последующих исследований, оказав влияние на развитие Учения о гумусе почв не только в России, но и за рубежом.

Почвенный гумус рассматривается как группа высокомолекулярных веществ специфической природы, образование которых связано с биохимическими процессами, протекающими в почвах; содержание, состав и природа гумусовых веществ в почвах разных условий формирования обуславливают своеобразие свойств почв и их роль в природных процессах (Тюрин, 1937).

Предложен *метод определения содержания органического углерода (гумуса) по окисляемости*, используемый до настоящего времени при массовых анализах почв (Тюрин, 1936).

Выделены *фульвокислоты*, рассматриваемые как один из компонентов специфических гумусовых веществ, на основе метода, разработанного И.В. Тюриным и модифицированного В.В. Пономаревой; получены их препараты, на основании изучения которых сделан вывод, что они представляют собой *оксикарбоновые азотсодержащие кислоты*, отличающиеся от гуминовых кислот *меньшим содержанием углерода, растворимостью в минеральных кислотах и воде, способностью к кислотному гидролизу и комплексообразованию с полуторными оксидами, а также обладающие высокой ёмкостью обмена* (Тюрин, 1940; Пономарева, 1947). Предложен *метод выделения фульвокислот с применением активированных углей* (Forsyth, 1947). Эти исследования послужили доказательством реальности существования специфических гумусовых веществ.

Установлены *географические закономерности гумусообразования* (Тюрин, 1949).

Опубликована *оригинальная методика изучения группового и фракционного состава гумуса, основанная на разной связи гумусовых кислот с минеральной частью почв* и, в связи с этим, разным отношении их к экстрагентам (Тюрин, 1951), неоднократно модифицированная В.В. Пономаревой и Т.В. Плотниковой (Николаевой); последняя из модификаций (Пономарева, Плотникова, 1968) до сих пор широко используется в почвоведении и смежных науках, позволяя получать очень ценную информацию для решения прикладных задач.

К середине XX века изучение гумуса вновь интенсифицировалось, чему способствовали существенные расхождения взглядов на его природу и происхождение. Во второй половине прошлого столетия появились новые подходы, взгляды и методы изучения. С развитием химических наук и почвоведения как теоретической науки, интерпретация стала более глубокой; объединяемые этими направлениями гумусовые вещества стали рассматривать как высокомолекулярные полимеры с уникальными химическими структурами переменного состава, которые в своей совокупности образуют особый класс веществ с переменным составом. Подходы к изучению основывались на позициях *классической химии, в том числе химии высокомолекулярных соединений и химии полимеров*. Новые подходы и методы привели к появлению очень большого эмпирического материала, который требовал обобщений и интерпретации с позиций *состояния науки второй половины XX века*.

Усиление внимания к проблемам гумуса привело к появлению во второй половине XX века серии обобщающих работ, написанных как российскими, так и зарубежными учеными. Среди них особо выделяются хорошо известные монографии и оригинальные работы М.М. Кононовой, Л.Н. Александровой, В.В. Пономаревой, Д.С. Орлова, Л.А. Гришиной, М.И. Дергачевой, А.Д. Фокина, И.Д. Комиссарова, И.И. Лиштвана, Флайга (W. Flaig), Дюшофура (Ph. Ducharfour), Стивенсона (F.J. Stevenson), Хана (S.U. Khan), Кумады (K. Kumada), Шнитцера (M. Schnitzer), Хейса (M.X.V. Hayes), Тейта (R.L. Tate) и многих других ученых. Каждая из монографий, с одной стороны, пронизана единой авторской концепцией, а с другой – представляет собой доступно написанную сводку о гумусе, обобщающую (на момент их выхода в свет) не только оригинальные, но и литературные материалы. Оригинальные статьи дают представление об уровне проводимых экспериментов, решении частных, но важных для развития взглядов на гумусовые вещества вопросов, а также новых материалах и выводах.

Методические работы по изучению механизмов формирования, структурных особенностей новообразованных и зрелых гумусовых кислот проводились большинством исследователей

отечественной и зарубежной науки второй половины XX века (Кононова, 1951; 1963; Орлов, 1974; 1990; Гуминовые препараты, 1971; Новые методы ..., 1972; Schnitzer, Khan, 1972; Лиштван и др., 1976; Алиев, 1978; Александрова, 1980; Орлов, Гришина, 1981; Martin et al., 1979; Schnitzer, 1978; Stevenson, 1982; 1994; Swift, 1996; и многие другие), что привело к появлению многочисленных материалов по химии гумусовых веществ и созданию большого количества гипотез и концепций в этой области знаний.

Остановим внимание только на этапных работах и исследованиях этого периода, а также выводах, внесших значительный вклад в развитие Учения о гумусе почв.

Впервые проведено *экспериментальное сопряженное изучение изменений*, происходящих с растительными тканями, подвергавшимися гумификации, *их морфологии, химического состава, природы новообразующихся гумусовых веществ*, а также участвовавшей в этом процессе микрофлоры (Кононова, 1951).

Разработано представление о *гумусовых веществах как продуктах конденсации или полимеризации фенолов и азотсодержащих органических соединений, участии в этом процессе окислительных ферментов микробного происхождения*. Несмотря на некоторые расхождения во взглядах, в конечном итоге авторы сошлись во мнении, что первоисточниками структурных единиц гумусовых кислот могут быть любые компоненты продуктов распада растительных тканей и/или метаболитов почвенных микроорганизмов, которые в результате конденсации или полимеризации превращаются в гумусовые кислоты (Кононова, 1963; 1972; Flaig, 1964; 1971; Kononova, 1966; Flaig et al., 1975). Работы этих авторов сыграли положительную роль в развитии взглядов на гумусовые вещества, выступив стимулятором интенсификации исследований, решающих проблему механизмов их формирования.

Получило развитие *функциональное* направление в познании гумуса почв, в задачу которого входило «изучение гумуса как специфически почвенного новообразования, продукта превращения мертвых органических остатков, агента сложных превращений минеральной почвенной массы, дифференциации почвенных профилей на горизонты, источника и средства минерального питания растений, комплекса специфических биохимических продуктов, определяющих эдафические свойства почв» (Пономарева, Плотникова, 1980, с. 6).

Впервые предложен перечень функциональных свойств гуминовых кислот и дано их подробное описание (Пономарева, Плотникова, 1980).

Разработаны *методы и приемы моделирования процессов гумификации*; высказаны *принципиально новые взгляды на механизм гумификации*, который представлен как сложный биофизико-химический процесс трансформации промежуточных высокомолекулярных продуктов разложения органических остатков в специфичные углеродистые соединения – гумусовые вещества (Александрова, 1980).

Экспериментально обосновано наличие основных элементарных звеньев гумификации: окислительное кислотообразование, формирование азотистой части молекулы, фракционирование и дальнейшая трансформация новообразованных гумусовых кислот, проявляющаяся в их дальнейшей ароматизации и гидролитическом расщеплении, сорбции и конденсации, а также процессы взаимодействия с минеральной частью почвы (Александрова, 1980, с. 133). Первый этап – окислительное кислотообразование – был подтвержден работами многих авторов (например, Visser, 1964; Dell' Agnola, Ferrari, 1971; Shiroya, Kumada, 1976; Swift, Posner, 1972; и др.).

Обстоятельно *охарактеризованы природа, свойства и классификация органо-минеральных производных* (Александрова, 1980), что до сих пор используется специалистами разного профиля, применяющими сведения о гумусовых веществах.

Предпринята попытка объяснить образование в процессе гумификации гумусовых кислот, различие которых может обуславливаться *разными типами процесса гумификации*, среди которых выделены *абиотический и биохимический тип* (Дюшофур, 1970).

Дана *сводка совокупности микропроцессов*, которые могли иметь место при формировании гумусовых веществ, причем обращалось внимание, что образование свободных радикалов, нуклеофильное и электрофильное замещения, окисление и восстановление, свойственные замещенным аренам, могут происходить также с участием ароматических и хиноидных структур, находящихся в составе полимеров, а при формировании ядра главная роль принадлежит ароматическим соединениям из лигнина (Гришина, 1986).

Экспериментально доказано, что *при различных естественных условиях и путях формирования и обновления образуется относительно устойчивый комплекс специфических гумусовых веществ*, характеризующихся, в известных пределах, общими чертами строения и свойствами; выявлено, что полный цикл гумификации от исходных веществ до формирования системы гумусовых соединений, осуществляется на начальных стадиях формирования почвы, а сформированные гумусовые вещества в зависимости от условий, в которых происходило их формирование и функционирование, *обновляются за счет матричной достройки или путем молекулярного обменно-сорбционного обновления* (Фокин, 1974; 1975; 1978).

Обосновано выделение *гумусовых веществ в особый класс природных соединений с переменным составом*, предложены критерии для этой процедуры, схема строения гуминовой кислоты, а также гипотеза об устойчивости гумусовых веществ за счет отбора термодинамически устойчивых соединений, имеющих общий тип строения (Орлов, 1974; 1977; 1990).

Детально исследованы инфракрасные спектры гумусовых кислот, выявлены основные важнейшие атомные группы, типы связей, присущие гуминовым кислотам и фульвокислотам, и предложены *таблицы*, способствующие расшифровке их ИК-спектров; с использованием этого метода, в частности, было показано присутствие многозамещенных ароматических колец, карбонильных и карбоксильных групп, метильных и метиленовых группировок (Орлов, 1974; 1990), что подтверждают исследования гумусовых кислот, выполненные другими методами (Schnitzer, Khan, 1972; Stevenson, 1982; 1994).

Предложена и экспериментально обоснована *модель макромолекулы гуминовой кислоты торфов и углей*, относящаяся к наиболее хорошо проработанной с точки зрения химически выделяемых фрагментов и физических параметров и, наряду со схемой Орлова (1990), широко востребованной (Комиссаров, 1971, цит. по: Комиссаров, Логинов, 1993).

Во второй половине XX в. разными исследователями предложено наибольшее количество схем или моделей строения гумусовых кислот почв, среди которых (кроме названных выше) следует обратить внимание на блок-схему В. Мистерски и В. Логинова (1959), гипотетический вид структурного фрагмента гумусовых кислот, предложенный Kleinhempel (1970), а также блок-схемы и модели Pauli (1967), Манской и Кодиной (1968), Schnitzer, Khan (1972), Schnitzer (1978; 1991), Felbeck (1971), Stevenson (1982), Wershaw (1993), Schulten (1995), Schulten, Schnitzer (1997; 1998); и др.

Предложена концепция, рассматривающая гумус как совокупность взаимосвязанных гумусовых веществ, представляющих собой *природную открытую саморегулируемую систему*, в которой все компоненты являются подобными системами более низкого иерархического уровня; обоснованы системные свойства этой функционирующей совокупности и показано, что она подчиняется всем законам функционирования открытых систем (Дергачева, 1984; 1989). На основе опубликованных материалов Дергачевой с помощью математического аппарата Лотки-Вольтерры *подтверждено*, что совокупность гумусовых веществ действительно является *открытой природной системой*, поскольку к ней *приложимы все предикаты диссипативных систем* (Ионенко, 1986).

Предложено *концептуальное понятие гумусового профиля почв*, показано, что он более рефлексивен, чем почвенный, отражает историю формирования почв и содержит информацию о смене природных условий за период его образования (Дергачева, 1984; Каллас, 1998, цит. по: Каллас, 2004).

Таким образом, к концу XX в., относительно структуры, состава и свойств гумусовых веществ, сложились вполне устойчивые представления. Взгляды, которые описываются в большинстве обобщающих статей, сборников, монографий как российской, так и зарубежной науки можно отнести к традиционным, поскольку они являются общепринятыми. Выявлено, что гумусовые вещества не имеют аналогов, представляют собой гетерогенную полидисперсную систему высокомолекулярных азотосодержащих ароматических соединений кислотной природы, которым присущи нерегулярность структуры, нестехиометричность элементного состава, гетерогенность структурных единиц и полидисперсность молекулярных масс, что к ним нельзя применить традиционный химический способ описания количественных параметров строения: определить число атомов в макромолекулах, а также типы связей между ними; установлено, что *все гуминовые вещества имеют единый принцип строения, независимо от источника гумификации*, что все они имеют так называемое ядро, представляющее собой ароматический

углеродный скелет, замещенный функциональными карбоксильными, гидроксильными, метоксильными и алкильными группами, и периферию, обогащенную полипептидными, полисахаридными и другими фрагментами.

Подходы к изучению гумусовых веществ как *природных химических веществ с переменным составом*, как *химической субстанции*, основывались на позициях классической химии, в том числе *химии высокомолекулярных соединений и химии полимеров*, а методологической основой был редуционистский подход, при котором исследуемое соединение сначала «разбиралось» на составные части, а затем из них моделировалась структура искомого вещества. В основе такого подхода лежит принцип сведения суммы частного к общему. Этот подход позволил накопить очень большой массив информации о составных частях гумуса (фрагментах, функциональных группах, индивидуальных биогенных веществах, т.е. о так называемых строительных единицах, формирующих гумусовые вещества), и на основе этой информации пытаться моделировать структуру этих сложнейших природных соединений.

Система взглядов, с наибольшей полнотой отраженная в монографических работах Д.С. Орлова (1974; 1990) и F. Stevenson (1982; 1994), заняла в последней четверти XX в. господствующее положение, однако уже в этот период гумусовые вещества начали рассматривать с разных методологических позиций: *как химическую субстанцию и как природную систему*.

Поскольку в XXI веке среди предлагаемых исследователями разных концепций пока ни одна не стала общепринятой, не заняла господствующее положение в системе взглядов на гумус и гумусовые вещества, говорить о парадигме начала XXI века преждевременно. На фоне борьбы различных мнений, традиционные взгляды, наиболее полно изложенные Д.С. Орловым и F. Stevenson, по-прежнему широко используются в исследованиях начала XXI в.

1.2. Состояние Учения о химии гумуса почв в XXI веке. Борьба мнений о статусе гумуса и гумусовых веществ не только продолжилась, но и обострилась в XXI в. Как и прежде, часть исследователей признавала гумусовые вещества, считая их главными и *специфическими продуктами гумификации единого принципа строения*, другие продолжали попытки доказывать, что гумусовых веществ специфической природы не существует, на самом деле они представляют собой сложную смесь природных органических веществ растительного и животного происхождения разной степени разложенности, а всё, что другие исследователи относят к этим веществам, является артефактом.

Публикации, появившиеся и появляющиеся в XXI в., количество которых, согласно данным Dou et al. (2020), постоянно увеличивается, можно условно разделить на несколько массивов: те, которые признают существование гумусовых веществ, используют традиционные методы их извлечения из природных сред, направлены на выявление новых фактов и частных закономерностей, с использованием новых методов и подходов; те, которые отражают дискуссию, относящуюся к реальности существования этих своеобразных природных веществ; и те, которые содержат новые взгляды на происхождение, химическую структуру и поведение их в природной среде.

Взгляды, отрицающие представление о гумусовых веществах как специфических природных соединениях, имеются в работах Glaser et al. (2001), Burdon (2001), Kögel-Knabner et al. (2008), Schmidt et al. (2011), Kleber (2015), Lehmann, Kleber (2015), Kleber, Lehmann (2019) и др., осмысление и подробное обсуждение которых, а также аргументы за и против их принятия приводятся в ряде работ последних 5–7 лет (Семенов, Когут, 2015; Piccolo, 2016; Иванов и др., 2017; Gerke, 2018; Hayes, Swift, 2018; 2020; Olk et al., 2019; Piccolo et al., 2019; Dou et al., 2020; Заварзина и др., 2021; и др.).

Продолжают появляться публикации, где даются характеристики гумусовых веществ как специфичных почвенных углеродистых соединений, которые расширяют и уточняют имеющиеся о них сведения (Перминова, 2000; 2008; Чуков, 2001; Попов, 2004; Холодов и др., 2011; 2015; Мильхеев, 2017; Schulten, Leinweber, 1996; 2000; Wershaw, 2004; Hsu, Hatcher, 2005; Albers et al., 2008; Ukalska-Jaruga et al., 2021; и др.). Публикуются работы, доказывающие существование в почвах гумусовых веществ как самостоятельного своеобразного естественного природного тела с традиционных позиций (Gerke, 2018; Hayes, Swift, 2018; 2020; Olk et al., 2019; Dou et al., 2020; и др.).

Традиционная полимерная гипотеза формирования гумусовых веществ имела положительное значение для развития Учения о гумусе почв, но она не давала ответы на очень многие вопросы, что направило энергию исследователей в русло поиска других механизмов этого процесса.

В начале нашего века была предложена новая супрамолекулярная концепция структурного состояния гумусовых веществ и возможного пути их формирования (Piccolo, 2001; 2002): гумусовые вещества – супрамолекулярные системы, «самосборка» которых приводит к формированию наночастиц, представляющих собой суперструктуры, собранные из относительно малых гетерогенных молекул, скрепляемых, главным образом, гидрофобными дисперсионными силами, или системы биомолекул, ассоциированные за счет межмолекулярных взаимодействий. Пикколо обращал внимание, что гумусовые вещества как супрамолекулярные ассоциации разнородных гетерогенных и относительно небольших молекул (не более 400–1000 Да), самоорганизуются в структуры с явно большими молекулярными размерами под действием слабых дисперсионных сил (ван-дер-ваальсовых, π - π , π -СН). Позднее, вслед за Пикколо, многие исследователи гумусовых веществ рекомендовали рассматривать их как агрегат макромолекул или как супрамолекулярные самоорганизующиеся системы образующихся из продуктов разложения растительных, микробных и животных остатков (Sutton, Sposito, 2005; Kelleher, Simpson, 2006; Vaigorri et al., 2007; Wells, 2019; и др.). Взгляд на гумусовые вещества как на супрамолекулярную систему, экспериментально доказанную Пикколо (Piccolo, 2001; 2002; Nebbioso, Piccolo, 2011; Nuzzo, Piccolo, 2013; Piccolo et al., 2019), уже начинает признаваться исследователями, которые не только признают, но и используют для объяснения ряда процессов, происходящих в почвах (Федотов, Шоба, 2013; 2015; Sutton, Sposito, 2005; Schaumann, 2006; Sirucek et al., 2021; и др.).

Параллельно обсуждаются разные аспекты проблемы, которые могут пролить свет на сущность гумусовых веществ, механизмы их происхождения и специфичность химического строения: амфифильность (Милановский, 2009), коллоидность (Федотов, Добровольский, 2007; Федотов и др., 2011; Федотов, Шоба, 2013), углерод-анионные координационные взаимодействия (Кудеярова, 2007), то есть с позиций, которые входят как составные части в основы супрамолекулярной химии (Лен, 1998). Пикколо с соавторами (Piccolo et al., 2019) дали подробный анализ имеющихся взглядов на структурное состояние гумусовых веществ и предложили новый аналитический прием – поэтапное отделение молекул от сложной объемной суперструктуры путем последовательного расщепления сложных эфиров и эфирных связей, и определения характеристик разделенных молекул с помощью спектральных и хроматографических методов. Концептуальный подход к последовательному фракционированию суперструктуры гумусовых веществ был опубликован не только в этой работе, но и ранее (Nebbioso, Piccolo, 2011).

Приведем пример еще некоторых публикации этого периода, в которых высказываются авторские оригинальные точки зрения на механизмы образования и трансформации гумусовых веществ, в частности работы Шинкарева, Гневашова (2001), Князева и др. (2009), Кудеяровой (2007), Федотова, Шобы (2015).

В первой работе авторы, обсудив проблему химического строения гумусовых веществ почв, пришли к выводу, что в реальных условиях гумусовые вещества могут представлять собой невалентно и валентно связанную совокупность, которая является частью пространственно структурированных органоминеральных систем, причем, как ими утверждается, «минимуму свободной энергии всей структурированной системы в целом может отвечать неопределенное множество возможных конформаций макромолекул гумусовых веществ» (Шинкарев, Гневашов, 2001, с. 1074). В другой работе обсуждается гипотеза, по которой в виде обязательных при осуществлении механизма формирования гуминовых кислот имеют место свободно-радикальные реакции поликонденсации низкомолекулярных органических соединений, источником которых выступают как фульвокислоты, так и различные продукты разложения почвенной биоты (Князев и др., 2009). Авторы показали, что возможность реального протекания свободно-радикальной конденсации органических соединений при формировании гуминовых кислот вполне вероятна потому, что различные природные источники свободных радикалов-гидроксидов, согласно их расчетам, вполне могут обеспечить течение этих процессов. Кудеярова (2007) предложила возможность понимания механизмов формирования и изменчивости гумусовых веществ с позиций координационной и органической химии, описав вероятные механизмы координационных связей и основные типы реакций. Она подчеркнула, что зольные элементы в ГВ следует рассматривать как структурные части почвенного гумуса, определяющие их трансформацию, и показала роль Fe и P в процессах преобразования гумусовых веществ. Федотов и Шоба (2015) предложили обобщить супрамолекулярный и макромолекулярный подходы, поскольку новообразованные макромолекулы, имеющие микроразмеры, могут входить в состав надмолекулярных систем.

Из анализа литературы также следует, что при изучении гумусовых веществ существенно расширился круг применяемых для характеристики гумусовых веществ методов и новых методических подходов. Можно отметить, например, повышенное внимание к разнообразным спектральным методам (^{15}N и ^{13}C ЯМР, ИК-спектроскопии Фурье, флуоресцентной спектроскопии), активного использования пиролизной масс-спектрометрии, возможности, достоинства и недостатки которых обсуждаются в разных оригинальных и обобщающих работах последних десятилетий (например, Перминова, 2000; 2008; Чуков, 2001; Тихова и др., 2004; Ширшова и др., 2004; 2013; Лодыгин, Безносиков, 2006; Холодов и др., 2011; 2018; Чуков и др., 2018; Preston, 2001; Šmejkalova, Piccolo, 2008; Abakumov et al., 2015; Gerke, 2018; Man-Man Xia et al., 2020; и др.). Большое распространение получило определение амфифильности ГВ (Степанов, 2008; Милановский, 2009; Матвеева и др., 2021; и др.), молекулярной массы и полидисперсности гумусовых веществ (Мамонтов и др., 2009; Василевич и др., 2015; Лодыгин и др., 2012; Perminova et al., 2003) и другие методы, которые, как правило, применяются в сочетании с традиционными методами, имеющимися в активе исследователей длительные периоды времени (например, Холодов и др., 2018; Шевцова и др., 2020). Имеются сведения, что применялась трансмиссионная электронная микроскопия (Baalousha et al., 2005) для выявления возможности самопроизвольного формирования упорядоченной организации фрагментов ГВ, новый метод изучения структурных параметров вещества – C_{1s} NEXAFS-спектроскопия (Schumacher et al., 2005) и многие другие методы. Приведенные примеры применения новых методов или активного обсуждения в публикациях пригодности уже используемых, служат хорошей иллюстрацией непрекращающегося поиска подходов к решению разных проблем, связанных с гумусовыми веществами, проводимого исследователями в последние десятилетия.

Среди проблем, лежащих в области химического изучения гумусовых веществ, очень активно обсуждаются вопросы о влиянии их выделения щелочными растворами, соответствия получаемых препаратов их нативному состоянию в почвах и, в связи с этим, признания реальности существования их в природных средах. Несмотря на обилие публикаций, в которых дается анализ имеющихся аналитических, экспериментальных исследований и обобщение высказанных мнений (например, Семенов, Когут, 2015; Холодов и др., 2015; Заварзина и др., 2021; Schaeffer et al., 2015; Gerke, 2018; Heyes, Swift, 2020; Olk et al., 2019; Durek et al., 2021), однозначного ответа на обозначенные выше вопросы так и не получено; при этом большинство исследователей считает, что если и есть определенное влияние на выделяемые гумусовые вещества, то оно несущественно или избирательно. Так что *традиционное щелочное экстрагирование ГВ*, просуществовавшее и активно используемое исследователями для выделения их из почв и других природных сред не одно столетие, позволившее установить ряд неопровержимых фактов о химическом составе, строении и свойствах этих уникальных углеродистых соединений, определить их роль в абсолютном большинстве почвенных процессов и, главное, выявить практически весь круг осуществляемых ими функций, *может и должно использоваться как универсальный метод выделения гумусовых веществ*. При этом *надо продолжать* изучение влияния щелочного экстрагирования на состояние гумусовых кислот, используя как можно большее разнообразие почв разных условий формирования, а когда накопится критический уровень материалов, можно будет сделать однозначный вывод, *определив те вопросы, объекты и условия их распространения, при которых щелочное экстрагирование должно исключаться*.

2. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В УЧЕНИИ О ГУМУСЕ ПОЧВ

Приведенный выше анализ сложной истории развития Учения о гумусе почв касался проблем, связанных с пониманием химической сущности этого природного компонента почв (и других природных сред): их химической структуры, механизмов образования и методов изучения. Но круг решаемых проблем не ограничивается вопросами, касающимися химической природы и происхождения этих уникальных веществ, не имеющих аналогов среди других природных соединений. На протяжении всей длительной истории этого Учения, гумус и гумусовые вещества вызвали повышенный интерес не только со стороны учёных естественнонаучных направлений, но и практиков, поскольку этот природный компонент играет значительную роль в генезисе, экологии и эволюции почв, обеспечении целого ряда экологических и глобальных природных функций, устойчивости биосферы и её отдельных подсистем (от почвы до живых организмов), миграции и аккумуляции веществ, формировании основных почвенных свойств, обеспечении и поддержании плодородия почв, а также в реализации многих других разного уровня и

направленности функций, которые выполняются почвой. Выполняя в биосфере широкий круг функций, гумусовые вещества в конечном итоге обеспечивают устойчивое существование жизни на Земле.

Систематизация взглядов, а также экспериментальных и аналитических материалов, относящихся к изучению гумуса и гумусовых веществ, привела к пониманию, что кроме вопросов, решаемых в пределах химического направления (как формируются гумусовые вещества и какова их химическая структура и реакционная способность? сохраняется ли нативность химической структуры ГВ при выделении их из природных сред? и каковы допустимые пределы ее изменчивости при анализах, связанных с их деструкцией? и т. п.), есть очень много вопросов другой направленности. К ним, прежде всего, относится необходимость познания *природных (экологических) причин*, которые определяют *появление и направленность механизмов формирования гумусовых компонентов* почв с вполне определенным составом, структурными особенностями и свойствами, определяющими специфику их поведения в меняющейся разными путями природной обстановке и выполнения функций разного уровня. Все эти проблемы, требуют совершенно других методологических и методических подходов, принципов интерпретации материалов и поэтому их лучше рассматривать в рамках другого направления в Учении о гумусе почв – экологического.

2.1. История развития экологического направления в XVIII–XX вв. Истоки экологического направления можно отнести к 60-м годам XVIII века, когда Валериус (Wallerius, 1761, цит. по: История учений о перегное, 1940) из данных химического анализа растений вывел, что гумус почвы является для них существенным питательным элементом. В своем первом руководстве по агрономической химии «*Agriculturae fundamenta chemical*» он соотнес понятие «гумус» с разложившимся органическим веществом и обозначил его как «перегной». Он также впервые упомянул экологическую роль гумуса, а именно важность перегноя как пищи для растений. Практически после этого указания Валериуса, перегной (гумус) начали представлять как важнейший источник питания растений.

Таким образом, в 60-е годы XVIII века впервые было обращено внимание на одну из важнейших функций гумуса почв – как источника питательных веществ для растений – и связи этой функции с природными условиями. Вопросы, связанные с этой функцией гумуса почв, имеют самую длительную историю развития в рамках экологического направления Учения о гумусе почв.

После упоминавшейся выше работы Валериуса (Wallerius, 1761, цит. по: История учений о перегное, 1940) в 1789 г. была опубликована книга русского ученого И.И. Комова «О земледелии» (1788), где автор рассмотрел роль перегноя в плодородии почв, обратил внимание на связь с ним водно-физических свойств и богатства почв питательными веществами. В книге Комова уже содержатся элементы гумусовой теории питания растений, развитой позднее Тэром (Thaer, 1809, цит. по: История учений о перегное, 1940).

Основываясь на обобщении информации, имеющейся к началу века в литературе, и опираясь на свой обширный практический опыт, свои многочисленные химические исследования разных видов почв и удобрений, Тэер, по сути, рассматривал питательные функции перегноя (гумуса). Он выдвинул и широко пропагандировал идею, что перегной почвы и плодородие – это синонимы и что именно гумус (перегной) доставляет пищу растениям. Он дал как химическую, так и агрономическую характеристику перегноя. Благодаря авторитету А. Тэера (Thaer, 1808; 1809, цит. по: История учений о перегное, 1940), положение о том, что гумус является существенным элементом питания растений, на долгие годы вошло в научный обиход, получив значение господствующей идеи в начале XIX в. Гумусовая теория питания растений не выдержала проверки временем и практически оказалась несостоятельной, ибо позднее появилась органоминеральная теория питания Л. Грандо (Grandeau, 1878, цит. по: История учений о перегное, 1940), согласно которой в *питании растений участвуют минеральные соединения*; однако благоприятное влияние гумусовых веществ на усвоение зольных элементов, например, железа, оказалось вполне доказанным фактом. При этом было установлено, что гумус служит источником минерального питания растений, вещества для которого высвобождаются в результате его разложения под влиянием деятельности микроорганизмов. Гумус обеспечивает более постоянное выделение этих необходимых растениям веществ и, в то же время, предохраняет их от потери из почвы.

Ни Шпренгель (Sprengel, 1826, цит. по: История учений о перегное, 1940), который считал, что перегной может служить прямой пищей для растений (хотя и не абсолютизировал это положение), ни ранее Дэви (Davy, 1814, цит. по: Ваксман, 1936), ни позднее Буссенго

(Boussingault, 1841, цит. по: История учений о перегное, 1940) не опровергали, в принципе, гумусовую теорию питания растений, но считали, что для растений необходимы также минеральные вещества. Шпренгель (Sprengel, 1837, цит. по: История учений о перегное, 1940), изучив химический состав гуминовой кислоты и её солей и обобщив эти сведения, предложил стройную систему представлений о значении их в плодородии почвы, обосновав ряд агрикультурных и агрохимических приемов.

Во второй половине XIX столетия представления о природе, происхождении гумусовых веществ и их роли в почве отличались неясностью и противоречивостью. Но в это время происходило активное развитие естественнонаучных направлений, что привело к появлению новых идей, новых направлений, концепций и теорий, в том числе и в Учении о гумусе почв, в развитии его экологического направления. Так, большое значение в развитии последнего сыграли работы Луи Пастера, основателя науки о биохимии микроорганизмов. Вслед за его открытиями, уже в последней четверти XIX века, трудами крупнейших ученых было установлено, что образование перегноя является не химическим или физическим процессом, а представляет собой процесс биологический, являющийся следствием разнообразной деятельности микроорганизмов, простейших, а также землероев, червей, насекомых (Post, 1862, цит. по: История учений о перегное, 1940; Дарвин, 1882; Костычев, 1886; Muller, 1887, цит. по: История учений о перегное, 1940; Ramann, 1888, цит. по: История учений о перегное, 1940; и др.). Были предприняты специальные исследования, где разложение органических веществ в почве изучалось как биологический и биохимический процесс. Было выявлено влияние на интенсивность этого процесса условий температуры, влажности, аэрации, физических свойств почвы, т.е. проводились, по сути, экологические исследования возможных источников гумуса и условий его образования, сведения о чем дают, кроме вышеназванных, также классические работы Шлезинга (Schloesing, 1876; 1902, цит. по: История учений о перегное, 1940), Костычева (1886; 1889; 1890), Вольни (Wollny, 1886; 1897, цит. по: История учений о перегное, 1940), Дегерена (Deherain, 1888, цит. по: История учений о перегное, 1940), Дегерена и Демусси (Deherain, Demussi, 1896, цит. по: История учений о перегное, 1940) и других. Именно этими работами окончательно было установлено, что перегной является для растения источником питательных элементов (в первую очередь, азота), переходящих в процессе разложения в усвояемые формы. В этих работах была установлена роль перегноя в создании структуры почвы, обеспечивающей в ней наиболее благоприятные воздушный и водный режимы.

Возникновение этого нового биологического, а по сути своей, *экологического* направления в изучении почвенного перегноя имело тем большее значение и было тем более перспективным, поскольку в тот же период В.В. Докучаевым были заложены основы учения о почве как о природном теле, образующемся в результате совокупной деятельности природных факторов-почвообразователей, среди которых исключительная роль принадлежит биологическому фактору – растительности и деятельности живых организмов. Согласно воззрениям В.В. Докучаева и П.А. Костычева, перегной рассматривался как важнейшая часть почвы, которая имеет огромное значение в почвообразовании, обуславливает почвенное плодородие, а наличие его в почве является тем качественным признаком, который отличает почву от мертвой материнской породы.

Труды В.В. Докучаева «Русский чернозем» (1883) и П.А. Костычева «Почвы черноземной области России» (1886) были началом нового периода в истории изучения почвенного перегноя и именно его функций. Докучаев и Костычев установили исключительную роль в образовании чернозема биологического фактора – многолетней травянистой растительности, корневые системы которой, ежегодно отмирающие в толще почвы, являются источником гумуса в корнеобитаемом слое. Большую ценность в развитии экологического направления в Учении о гумусе почв имеют исследования Костычева по гумификации растительных остатков и влиянию на этот процесс экологических условий: микроорганизмов, животных, температуры, аэрации, физических и химических свойств почвы. Поставив и пытаясь решить вопрос о причинах накопления перегноя в черноземе, Костычев установил прямую связь между его накоплением под покровом многолетней травянистой растительности и физическими свойствами почвы, обеспечивающими сохранение в ней влаги, тем самым практически расширив список функций, выполняемых гумусом почв. Идеи В.В. Докучаева и П.А. Костычева получили развитие в многочисленных работах их учеников и последователей, таких как Н.М. Сибирцев, П.Ф. Бараков, И.Ф. Леваковский, П.Р. Слѣзкин, И. Налетов, основательно изучивших вопрос о взаимодействии гумусовых веществ с минеральной частью почвы и ряд других частных вопросов.

Новое – биологическое – направление в изучении почвенного перегноя, обязанное появлению и развитию новых дисциплин – микробиологии и почвоведения – оказало существенное влияние на развитие Учения о гумусе, и, несомненно, сыграло значительную роль в становлении экологического направления в рамках этого учения.

В последние два десятилетия XIX в. и первые годы XX в. имели место многочисленные исследования по разложению растительных остатков и выяснению их роли в образовании гумуса. В соответствии с новыми представлениями о биологической основе процесса гумусообразования (и в отличие от искусственного воспроизведения этого процесса путем обработки растительных веществ кислотами или щелочами), ученые проводили свои опыты в условиях, обеспечивающих нормальную биологическую деятельность, хотя, как правило, они использовали изолированные растительные вещества. Работы Гоппе-Зейлера (Hoppe-Seyler, 1889), Омелянского (1899; 1906), Ван-Итерсона (Van-Iterson, 1904, цит. по: История учений о перегное, 1940), касающиеся разложения целлюлозы, внесли свой вклад в познание процесса образования гумуса, однако не ответили однозначно на вопрос о роли целлюлозы в формировании гумусовых веществ, поскольку были проведены с изолированным материалом. Подобным недостатком отличались работы Снайдера (Snyder, 1898, цит. по: История учений о перегное, 1940), Сузуки (Suzuki, 1906–1908, цит. по: История учений о перегное, 1940) и других исследователей, изучавших гумификацию изолированных углеводов, жиров, белков и других веществ. В этот период представление о том, что гумусовые вещества являются сложными соединениями, образующимися из продуктов разложения растительных остатков, и что в их формировании может участвовать не одно какое-то, а два или несколько веществ, только зарождалось.

Практически весь XIX в. и большую часть XX в. экологическое направление характеризовалось накоплением эмпирических материалов о роли гумусовых веществ в природных процессах, но более всего рассматривалось их значение в плодородии почв, а также и в разнообразных почвообразовательных процессах. К середине XX в. актуальность в рамках экологического направления приобрело накопление информации об обусловленности специфики состава, структуры и свойств гумусовых веществ условиями природной среды, в которой они формировались.

Среди исследователей XX века, сыгравших выдающуюся роль в изучении *экологической роли гумуса* и его компонентов в природных процессах, а также природной обусловленности их специфичности, преобладали российские ученые. Это вполне объяснимо, поскольку в основе их исследований лежало Докучаевское представление о почвах как природном теле, являющемся продуктом совокупного влияния факторов почвообразования; учет экологических условий формирования почв был неизбежным. С.А. Ваксман (1937) в своем предисловии к русскому изданию монографии «Гумус: происхождение, химический состав и значение его в природе» писал: «Вклад, сделанный русскими исследователями в науку о почве, вообще, и о гумусе, в частности, имеет такое большое значение и является настолько общепризнанным, что на этом моменте нет необходимости останавливаться» (с. 9). Это подтверждается, например, и тем, что монография М.М. Кононовой, переведенная и опубликованная за рубежом вскоре после ее выхода в свет (Кононова, 1966) до сих пор встречается в списках используемой литературы в зарубежных публикациях.

Такие авторы, как В.Р. Вильямс, И.В. Тюрин, М.М. Кононова, В.В. Пономарева, Л.Н. Александрова, Д.С. Орлов и др., рассматривая разнообразные аспекты формирования гумуса почв, его природы, состава и свойств, неизменно давали анализ роли гумуса в почвообразовании и плодородии, по сути, подвергали анализу вопросы, связанные с экологическими функциями почв и их природной обусловленностью. О большом внимании исследователей гумуса к вопросам, связанным с его функциями в процессах почвообразования и плодородии почв, говорит наличие в монографиях разных авторов разделов, посвященных роли гумуса в этих процессах, вынесенных в ряде случаев в заголовки (Ваксман, 1937; Тюрин, 1937; Кононова, 1951; 1963; Александрова, 1980; Кононова, 1966; и др.).

К 80–90-м годам XX столетия уже были сформированы представления об участии ГВ в основных природных процессах: в перераспределении и запасании вещества и энергии, произведенных растительностью в процессе фотосинтеза, формировании профиля почв и почвенной структуры, обеспечении и специфике водного, теплового и питательного режимов, а также плодородия почв, в выветривании минералов, аккумуляции, депонировании и миграции макро- и микроэлементов, стимуляции роста и развития растений, связывании вредных для живых

организмов минеральных и органических веществ (экотоксикантов) и многих других процессах и явлениях, как на уровне почв, так и биосферы в целом.

После оформления в 80-х годах XX в. Г.В. Добровольским и Е.Д. Никитиным «Учения о функциях почв» в качестве самостоятельного научного направления (Добровольский, Никитин, 1986), обобщение эмпирических материалов о роли гумусовых веществ в природных процессах и акцентирование внимания исследователей на определении, описании и систематизации экологических функций гумуса существенно интенсифицировалось. Вскоре Д.С. Орловым (Орлов, 1993) впервые был предложен список основных функций гумусовых веществ почв и краткая их характеристика. Были выделены *аккумулятивная, транспортная, регуляторная, протекторная и физиологическая* функции.

Все перечисленные функции крайне важны в функционировании почв, экосистем, биосферы в целом и поддержании жизни на Земле, поэтому их изучение относится к одной из самых актуальных проблем Учения о гумусе почв. Но среди работ экологической направленности, связанных с гумусом и гумусовыми веществами почв, есть проблема, результаты изучения которой крайне нужны специалистам (как ученым, так и практикам), использующим сведения об этом компоненте почв – это поведение их во времени, в постоянно меняющейся в процессе эволюции или антропогенных воздействий природной обстановке. Для этого необходимо знать *причины и количественные взаимосвязи* имеющей место специфичности гумусовых веществ и выполняемых ими функций с особенностями природной среды, в которой они формировались и функционируют. Чтобы прогнозировать поведение гумуса и гумусовых веществ в природной обстановке, меняющейся естественным путем или при антропогенном воздействии, нужны ответы на вопросы: каковы причины различий гумусовых веществ, сформированных в разных условиях? и каковы причины разного проявления и сочетания выполняемых ими при этом функций?

Наиболее всестороннее изучение вопроса о *причинах специфичности содержания, состава гумуса и отдельных его компонентов в почвах разных условий формирования* можно найти в монографических работах российских ученых-почвоведов, чьи исследования составляют основу экологического направления Учения о гумусе почв: И.В. Тюрина, М.М. Кононовой, В.В. Пономаревой, Л.Н. Александровой, Д.С. Орлова, А.Д. Фокина, Л.А. Гришиной, М.И. Дергачевой, О.С. Безугловой, Г.Д. Чимитдоржиевой, Б.М. Клёнова, С.Н. Чукова, Т.Т. Ефремовой, В.А. Безносикова, а также в более частных оригинальных публикациях их учеников и последователей. Это не значит, что нет зарубежных работ такой направленности, но основу решения обозначенной выше проблемы в XX в. составили работы советских и российских ученых.

К настоящему времени установлено, что почвы разного генезиса (то есть разных природных условий и механизмов образования) имеют неодинаковый уровень содержания гумуса, специфичный для каждого из типов почв его состав, а также различающиеся, но относительно постоянные пределы параметров состава, структурных особенностей и свойств гуминовых кислот. Материалов, показывающих особенности состава, структуры и свойств гуминовых кислот, их соотношения с другими компонентами гумуса для разных природных объектов, в отечественной и зарубежной литературе очень много, но их обобщение и выведение *количественных закономерностей* зачастую затруднено из-за разнообразия приемов, условий их выделения, выполнения аналитических и инструментальных определений и даже детальности отбора почвенных проб в полевых условиях.

На *качественном и полуколичественном* уровне различия состава гумуса и гуминовых кислот почв разных условий формирования были установлены во второй половине XX века. К этому времени уже имелись отдельные опубликованные работы, показывающие *количественные связи* запасов и состава гумуса почв, в основном с периодом биологической активности (Бирюкова, Орлов, 1978; Морозов, 1993; Орлов и др., 1996; 1997; Шамшин, Рыжова, 2000). В одной из первых работ по этой теме (Бирюкова, Орлов, 1978) были описаны тесные положительные корреляции глубины гумификации (под которой авторы понимали величину отношения $C_{гк}:C_{фк}$) с продолжительностью периода биологической активности (ПБА – число дней в году со среднесуточной температурой выше $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при запасе продуктивной влаги не менее 1–2%) для гумусовых горизонтов автоморфных почв континентальной фации умеренного климата. Позднее А.И. Морозов (1993) предпринял попытку дать свое видение этой связи, описав ее системой уравнений. Было показано, что для территории Восточно-Европейской равнины имеются тесные связи ($r=0,93$) между величиной отношения $C_{гк}:C_{фк}$ и ПБА (Орлов и др., 1996) и между запасами гумуса и этой же характеристикой климата (Орлов и др., 1997). Имеется работа в

материалах конференции, в которой дана постановка этой проблемы в приложении к изучению палеопочв и представлена связь типов гумуса современных и палеопочв с условиями сочетания тепло- и влагообеспеченности в виде матрицы (Дергачева, 1995).

Таким образом, к концу XX в. вопрос о различиях гумуса и гумусовых веществ почв, сформированных в разных биоклиматических условиях получил вполне однозначный ответ: в разных природных обстановках состав, структурные особенности и свойства этих веществ обладают своеобразием; в настоящее время он не является дискуссионным, хотя сведений о количественных связях параметров и свойств гумусовых веществ с экологическими условиями их формирования на локальном уровне пока недостаточно, чтобы выявить и описать универсальные и своеобразные свойства этого почвенного компонента, важные для прогнозных выводов.

Что касается влияния природных условий на особенности выполняемых гумусовыми веществами функций, то этот вопрос на конец XX в. находился в стадии накопления данных. Выводы при изучении частных аспектов этой проблемы оказывались часто противоречивыми, так что сформулировать какие-то обобщающие положения в этом направлении, выявить и установить какие-либо общие закономерности не представлялось возможным.

Расширенное и основательное изучение *количественных закономерностей причин специфичности параметров состава, строения и свойств гумусовых веществ (а также их соотношений) в связи с экологическими условиями формирования (назовем их для краткости эколого-гумусовые связи) не только на глобальном, но и региональном, а также локальном уровне, получает развитие уже в XXI веке.*

Таковы наиболее важные – этапные – работы ученых в рамках экологического направления Учения о гумусе почв за период от момента его зарождения до конца XX века, когда вопросы, связанные с проблемами выделения, описания, обоснования функций гумусовых веществ, заняли одно из ведущих мест в этом Учении. Следует ещё раз подчеркнуть, что изучение *вопросов генезиса химического состава, строения и свойств гумусовых веществ, а также механизмов их формирования не* относятся к экологическому направлению Учения о гумусе почв, тогда как познание *природных (экологических) причин, обуславливающих формирование компонентов гумуса и гумусовых веществ с вполне определенным составом, структурными особенностями и свойствами, их роль в природных процессах, а также специфика поведения* в меняющейся по разным причинам природной обстановке и *выполнения гумусовыми веществами функций* разного уровня должны решаться в рамках экологического направления Учения о гумусе почв.

2.2. Состояние экологического направления в Учении о гумусе почв в XXI в. Прежде чем приступить к обсуждению наиболее актуальных и наименее изученных вопросов, касающихся состояния экологического направления в Учении о гумусе почв в первые два десятилетия текущего века, хотелось бы обратить внимание на ряд обстоятельств. Первое касается освещенности в печати вопросов, связанных с выполнением гумусом и гумусовыми веществами своих многочисленных функций. Тот факт, что ГВ представляют собой полифункциональные природные образования, уже давно не вызывает сомнений. Публикаций по выполняемым ГВ функциям так много, освещают они такое громадное количество *частных* вопросов, охватывают не меньшее количество объектов и, главное, методик, что требуют отдельного анализа и обобщения. Больше всего работ среди российских и зарубежных публикаций посвящено физиологической и протекторной функциям ГВ, участию гумуса в образовании структуры и плодородия почв, а также отдельным вопросам, касающимся их регуляторной роли в экосистемах и биосфере. В первые годы текущего века был выделен еще ряд экологических функций гумусовых веществ (Dergacheva, 2001) и на данный момент времени основной их круг включает функции аккумуляции, депонирования, мобилизации и иммобилизации, физиологической стимуляции, ингибирования, а также миграционно-транспортную, протекторную и меморатную (хранителя информации). Каждая из перечисленных функций имеет большое значение в существовании биосферы и поддержании жизни на Земле, но при этом все они взаимосвязаны, представляют собой систему, целостным свойством которой и является осуществление регуляции функционирования экосистем любого уровня организации, вплоть до биосферы. Это определяет, в том числе, их ведущую роль в сохранении биоразнообразия и устойчивого развития жизни, ибо они только как целостная взаимосвязанная совокупность способны обеспечивать их регуляцию. Однако работ, содержащих обобщенный анализ всех функций или детальные характеристики отдельных из них, пока немного (Чуков, 2001; Дергачева, 2001а; 2003; Семенов, Когут, 2015;

Orlov, Sadovnikova, 2005; Murphy, 2014; de Melo et al., 2016; Olk et al., 2019; Gautam et al., 2021; и др.).

Второе обстоятельство касается изученности причин, обуславливающих специфичность параметров этих уникальных веществ и связей их состава, строения и свойств с экологическими условиями формирования и функционирования. Анализ специальных публикаций, посвященных этой сложной проблеме, показал, что и в этой области обсуждается очень много частных вопросов. При этом многочисленность самых разнообразных объектов, разных приемов и применяемых методик их изучения, а также различных решаемых задач, получаемых материалов и неоднозначных выводов пока не дают возможность провести обобщение имеющихся опубликованных работ. Хочется напомнить, что гумус и гумусовые вещества – динамичные (функционирующие) образования, свойства которых в течение года, сезона или любого более короткого промежутка времени могут меняться. На динамичность состояния системы гумусовых веществ почв и на необходимость подходить к отбору почвенных образцов с учетом поставленных задач и сроков указывалось еще в 1984 году, причем вывод этот был сделан на материалах сопоставления характеристик гумуса в статике и динамике (Дергачева, 1984). В названной публикации обсуждаются сроки, в которые лучше отбирать образцы при решении разных задач. Надо понимать, что результаты и выводы могут характеризовать состояние гумусовых веществ или их соотношение в данный конкретный момент времени. Отбор образцов из одной и той же точки спустя, например, полмесяца или месяц, может не позволить получить тот же самый вывод, сделанный на основе анализа при другом сроке отбора образцов. Так что необходимо обязательно учитывать сроки взятия образцов на анализы, как и приемы их отбора.

Отбор почвенных образцов, пожалуй, является одним из самых важных обстоятельств в изучении поведения гумуса и гумусовых веществ во времени: от того, каким образом сформирован образец, который будет подвергаться анализу, зависят выводы. Например, отбираете ли вы средний образец из всего почвенного горизонта, или образец из его центральной части, или сплошной колонкой. Надо помнить, что почвы формируются согласно разным моделям за разные промежутки времени, так что образцы из верхней, средней и нижней части горизонтов (образование которых могло происходить не одну тысячу лет) могут отражать разное состояние и смену природных условий во время формирования гумусовых веществ.

Часто материалы исследования гуминовых веществ (решения каких бы проблем они ни касались) невозможно обобщать и сравнивать потому, что некоторые исследователи подвергают их жесткой очистке от зольных элементов при помощи $\text{HF}+\text{HCl}$ или 6 н. HCl , другие – исключают эту процедуру, основываясь на том, что эти воздействия, как убедительно показано Тиховой и др. (2008), изменяют основные характеристики гуминовых кислот, что зольные элементы в ГВ представляют собой структурные элементы, определяющие их трансформацию (Кудеярова, 2007), а их общее содержание и состав в ГК отражают специфику природной зоны, в которой они формируются (Dergacheva, 2000). Кроме того, как подчеркивает Gerke (2018), ряд элементов может выступать в качестве катализаторов при процессах их формирования, а также влиять на конформацию химической структуры ГВ. Все обозначенное выше может быть причиной часто встречаемой противоречивости выводов разных авторов.

Третье обстоятельство касается интерпретации материалов изучения ГВ, каких бы аспектов она ни касалась. Дело в том, что даже при признании этого компонента почв и его составляющих самостоятельными природными углеродистыми веществами, в настоящее время анализ материалов основывается на разных методологических и методических позициях. Одни авторы традиционно рассматривают все аспекты существования, поведения и выполнения функций гумусовыми веществами, считая их почвенной субстанцией, подчиняющейся химическим законам существования и поведения природных высокомолекулярных соединений или полимеров. Другие – рассматривают гумус как систему гумусовых веществ (СГВ) специфического состава, строения и свойств, имеющую все свойства открытых природных систем, одной из подсистем которых являются гуминовые кислоты. Эти системы обладают *саморегуляцией* и могут *восстанавливать* свою структуру.

Системные свойства взаимосвязанных природных объектов описаны многими авторами, анализирующими разные природные тела с позиций системного подхода. Что касается гумуса почв, то концепция, рассматривающая гумус как совокупность взаимосвязанных гумусовых веществ, представляющих собой *природную открытую саморегулируемую систему*, в которой все компоненты являются подобными системами более низкого иерархического уровня, была

предложена автором в 80-е годы прошлого столетия (Дергачева, 1984; 1989). Были обоснованы свойства гумуса как системы гумусовых веществ, показано, что она является открытой природной системой, характеризуется упругой устойчивостью организации, цикличностью превращений, эмерджентностью, иерархичностью составляющих ее элементов, которые представляют собой аналогичные открытые (под)системы. Особое внимание было уделено возможности самоорганизации системы, которая, согласно принципам термодинамики неравновесных систем, представляет собой возникновение упорядоченных макросостояний или, так называемых, диссипативных структур, характеризующихся наименьшей величиной энтропии при неминимальном значении свободной энергии системы. Тогда же В.И. Ионенко (1986) с помощью математического аппарата Лотки-Вольтерры было доказано, что совокупность гумусовых веществ действительно обладает всеми признаками диссипативных систем.

В 80-х годах прошлого века – в период обоснования концепции о гумусе как системе гумусовых веществ, обладающей всеми свойствами открытых природных систем, понятие «самоорганизация» не было дано точного объяснения, хотя сам термин «самоорганизующаяся система» был предложен еще в 1947 году У. Эшби (1947, цит по: Эшби, 1969). Это понятие использовалось, скорее, на интуитивном уровне и под ним понималась «способность системы сохранять свою целостность при активном взаимодействии с окружающей средой и в процессе возникновения внутренней согласованности, внутренней упорядоченности макросостояний, выбирать одну из возможных линий поведения, т.е. достижения конечного состояния» (Дергачева, 1989, с. 42). Особо следует подчеркнуть, что способность к самоорганизации имеют только открытые системы, которые за счет поступления энергии извне способны противостоять возрастанию энтропии, а самоорганизация возникает в них спонтанно (Васильев, Романовский, 1984). Позднее этому понятию было уделено повышенное внимание, а после появления новой химической науки – супрамолекулярной химии (Лен, 1998), понятия «самосборка», «самоорганизация», «самовосстановление» приобрели химический смысл. Только системы, обладающие самоорганизацией и самовосстановлением способны выполнять определенные функции в биосфере, тогда как любая смесь – случайная совокупность механически собранных веществ, не имеющих тесных связей между составляющими ее компонентами, не может выполнять функции, поскольку для этого требуются сильные внутренние связи между составляющими их компонентами и преобладание их по силе над внешними, а также повторяемость внешних условий в определенные промежутки времени (Садовский, 1974).

Положение о том, что гумус почв является самоорганизующейся и саморегулируемой системой гумусовых веществ получило подтверждение в виде установления в полевом эксперименте возможности самовосстановления системы, когда разными методами наглядно было показано, что почвы, существенно изменившие характеристики гумусовых веществ при их освоении (богара), в процессе орошения в течение 5, 13 и 20 лет постепенно меняли эти показатели в сторону сближения их с целинными вариантами (Дергачева, 2001б). В пользу того, что гумус представляет собой систему, говорят также экспериментальные исследования, показавшие возможности структурных достроек гуминовых веществ (Фокин, 1974; 1975; 1978).

Одной из особенностей гумусовых веществ почв как природных систем является способность отражать формирующую их природную среду и её изменения в своих внутренних состояниях. Это находит выражение в соответствии их состава, структуры и свойств условиям, в которых они образуются, а также в возможности количественных изменений разнообразных признаков состава и свойств, структурных перестройках, появлении новых свойств и т.п. Изменения, происходящие в ответ на внешние воздействия природной среды, могут быть разные: одни, появляются на короткий срок влияния изменяющихся условий, другие – отражают постоянное длительное действие, вызывая вполне адекватные трансформации состава, структуры и свойств, которые сохраняются во времени. Наиболее специфичными по отношению к природной среде являются гуминовые кислоты, которые в своем составе и свойствах несут информацию о состоянии СГВ, почв и экосистем, а также их соотношение с другими компонентами гумуса. Это вызывает повышенный интерес к изучению разнообразных параметров состава, структуры и свойств гуминовых кислот с целью выявления признаков, формирующихся в них как ответ на разной длительности воздействия (возмущения) природной среды и использование их при оценке трансформационных процессов, происходящих в почвах. Таким образом, гуминовые кислоты могут не только фиксировать состояние природной среды своего формирования, но и использоваться при изучении состояний природной среды в периоды разной длительности,

отражающихся в свойствах почв, а также для выявления особенностей поведения СГВ в меняющейся природной обстановке.

Преимуществом использования системного подхода при интерпретации материалов, касающихся поведения системы гумусовых веществ в меняющейся природной обстановке как под влиянием естественных причин, так и в процессе антропогенных воздействий, является, прежде всего, возможность выделять любую совокупность взаимодействующих и взаимосвязанных гумусовых веществ в систему, рассматривать ее взаимоотношение с внешней средой и поведение при изменении последней, а также решать самые важные вопросы, касающиеся реагирования СГВ на любые внешние воздействия. Системный подход к анализу состояний сложных природных систем дает возможность *вычленять влияние какого-то одного фактора* через подбор, сравнение и анализ *монофакторных рядов* (т.е. с одной переменной). При этом, что очень важно, можно выявлять изменчивость или сохранность системы гумусовых веществ, не изучая химические превращения, которые возникают в ответ на внешние воздействия, а использовать понятие «черный ящик», интегральные характеристики которого могут быть маркерами происходящих изменений и их направленности или индикаторами состояния СГВ и почв. Кроме того, *применение системного подхода* при изучении поведения системы гумусовых веществ во времени с целью использования этой информации при прогнозных оценках состояния почв и природной среды, их формирующей, *помогает сократить время на проведение исследований*, поскольку понимание взаимосвязанной совокупности ГВ как системы исключает проверку и верификацию тех ее характеристик, которые присущи всем природным открытым системам. Обоснованное применение понятия «система» к совокупности гумусовых веществ при решении любых задач *априори подразумевает, что они обладают такими признаками как наличие обратных связей, самовосстановления состояний, целостных свойств, которые не адекватны свойствам каждого отдельного компонента, а также имеют возможность выполнения функций в биосфере*. Все это может использоваться при интерпретации материалов и не требует верификации другими методами.

К сожалению, очень много разночтений в выводах, основанных на одинаковых материалах, но интерпретируемых, с одной стороны, на основе признания гумусовых веществ как химической субстанции (полимеров), подчиняющейся законам традиционных химических направлений: органической химии, химии природных соединений или химии полимеров, и, с другой, на основе системного подхода. Если подходить с позиций традиционной химии, то предположение о том, что ГВ должны терять со временем свою алифатическую периферию при действии на них микроорганизмов, становится более ароматичными и, как утверждают стоящие на таких позициях исследователи, более стабильными, кажется вполне логичным. Если проводить интерпретацию этих же материалов с позиций системного анализа, то увеличение ароматичности гуминовых кислот в глубоких горизонтах почв или в более древних почвах может означать, что СГВ могла формироваться в иных, более оптимальных для гумусообразования условиях. Могут иметь место обстоятельства, когда почвенный профиль формировался не по постлитогенной модели, когда условия в течение формирования его горизонтов изменялись от более древнего к современному времени, например, в сторону похолодания. О том, что основные характеристики ГК сохраняются во времени из-за присущей им способности к самовосстановлению и что их состав и структура зависят от природных условий в период их формирования, а не от возраста, свидетельствуют очень большие статистически достоверные материалы по сравнению СГВ почв с датированными горизонтами в пределах одного профиля и диагностированные параллельно другими методами палеопочвоведения и палеогеографии, которые имеют самые разные характеристики гуминовых кислот, соответствующие условиям их образования от тундры и тайги до степи и полупустыни. Имеются эмпирические материалы по характеристике многослойных плиоцен-голоценовых отложений с признаками влияния педогенеза в виде гумусовых и других палеогоризонтов, среди которых не выявлена связь увеличения ароматичности ГК с их возрастом, но показана связь с условиями их формирования. Такие материалы имеются, в частности, в обобщающих монографиях, в том числе вышедших не только в 80–90 годах прошлого столетия (Дергачева, 1984; 1989; 1997), но и появившихся в текущем веке (Дергачева и др., 2000; 2006; Память почв ..., 2008; Дергачева, 2018; и др.). На отсутствие связи состава и структуры ГВ с возрастом почв указывали также Calderoni and Schnitzer (1984).

Поскольку наиболее надежные и сопоставимые обобщения требуют, прежде всего, использования унифицированных аналитических приемов и методических подходов к получению

и интерпретации материалов, обращаем внимание, что все материалы, начиная с 1975 года, публикуемые в работах автора, ее учеников и единомышленников, получены в идентичных условиях, начиная от *отбора образцов* (с учетом времени, зависящего от решаемых задач, а также сплошной колонкой с учетом видимых границ горизонтов каждые 5–10 см или меньше), *выделения гуминовых кислот из почв* (из щелочной вытяжки после предварительного их декальцирования и осаждения при $\text{pH}=2$ в процессе выполнения анализа по составу гумуса по методу Пономаревой-Плотниковой в модификации 1968 г., без проведения обеззоливания жесткими методами с применением $\text{HF}+\text{HCl}$ или 6 н. HCl , и при высушивании их на водяной бане при t не выше $40\text{ }^\circ\text{C}$), и заканчивая *анализом препаратов аналитическими и инструментальными методами* (элементный анализ, спектральные методы, гельхроматография, датирование AMS и радиоуглеродными методами, анализ микроэлементного состава методом РФА-СИ и др.). Таким способом было выделено около 10 тысяч образцов гуминовых кислот из почв и палеопочв разного возраста и условий формирования, анализ которых позволил выявить ряд устойчивых закономерностей поведения почв в пространстве и во времени (Дергачева, 2018).

Эти материалы представляют интерес, поскольку позволяют оценивать поведение системы гумусовых веществ почв во времени и при влиянии на них изменений природной среды, происходящих по разным причинам, в том числе при наблюдающемся потеплении климата.

Для оценки состояния СГВ и выявления направленности и причин ее изменчивости в процессе эволюции почвообразования и антропогенных воздействий, первоначально был использован широкий круг показателей, характеризующий состав, структуру и свойства ГВ, которые могли бы служить маркерами или индикаторами изменения ГВ и отражаемых в них условий природной среды. Эта оценка показала, что *наиболее надежными и тесно связанными между собой показателями ГК, которые коррелируют со средними многолетними параметрами климата (температура воздуха, количество осадков, актуальные температуры больше $10\text{ }^\circ\text{C}$) и могут служить индикаторами состояния или трансформации гуминовых кислот, являются, прежде всего, три показателя: соотношение двух основных структурообразующих элементов (Н:С), первый момент спектров флуоресценции по Паркеру (M_1) и коэффициент экстинкции по Орлову (E^{TK})*. Эти показатели варьируют незначительно, во всяком случае, их величины не выходят за пределы среднестатистических характеристик, выявленных для почв определенных условий формирования и функционирования (Дергачева, 2018). Изучение ГК почв одинаковых условий образования, распространенных в разных регионах, дает аналогичные показатели. Например, сравнение тундровых почв территорий ключевых участков Монгун-Тайга (Тува) и Укок (Горный Алтай), имеющих практически идентичные параметры климата, показало большое сходство их ГК (Бажина и др., 2019). Обнаружено также, что гуминовые кислоты горно-тундровых почв Тувы и тундровых почв северных районов Сибири имеют аналогичные диапазоны колебаний Н:С, но различающиеся – О:С (Дергачева, 2018). Первые имеют климатогенную обусловленность, вторые зависят от гранулометрического состава и степени аэрации почв. Показано, что почвы, формирующиеся в условиях тундры северных районов России и горных тундр юга Сибири при одинаковых диапазонах колебаний Н:С, резко отличаются величинами О:С; последние в хорошо аэрируемых дресвянистых почвах горных районов юга Сибири имеют величины этого показателя в 1,5–2 раза выше, чем в почвах северных районов этого региона, испытывающих переувлажнение; гуминовые кислоты почв разных типов, имеющих одинаковый гранулометрический состав, как правило, имеют близкие диапазоны изменений О:С при резко различных величинах Н:С. Установлены связи величин этих показателей (Н:С, M_1 и E^{TK}) с количественными параметрами климата. На основе этих связей рассчитаны возможные условия формирования датированных палеопочв разного геологического возраста (Дергачева, 2018). Примеры поведения ГК почв разных условий формирования, индицируемые показателем M_1 , приведены также в статье Бажиной и Дергачевой (2021) в настоящем номере журнала.

Анализ имеющихся материалов изучения разных количественных параметров, характеризующих ГК почв, позволил также выявить, что показатели, соответствующие отношению алифатической периферии и ароматической части ГК, в том числе, коэффициент цветности по Welte ($E_4:E_6$), коэффициент α , показывающий соотношение интенсивностей флуоресценции в длинноволновой к коротковолновой частях спектра испускания при одной длине возбуждения, а также величина соотношения ароматической и алифатической частей по результатам ^{13}C ЯМР-спектроскопии обладают более широким варьированием, чем перечисленные выше показатели, однако это варьирование происходит внутри диапазонов,

характерных для ГВ почв разных условий формирования. Один из примеров можно обнаружить в статье Бажиной и Дергачевой (2021), остальные – в перечисленных выше монографиях.

Имеющиеся многочисленные материалы изучения разных аспектов состояния и поведения СГВ широкого разнообразия почв (Дергачева, 1997; 2018; Дергачева и др., 2000; 2006) показывают, что:

- выделение гумусовых веществ щелочными экстрагентами и гуминовых кислот подкислением растворов до сильнокислой реакции среды не влияет существенно на общий характер химического строения последних, о чем свидетельствуют несущественное варьирование этих показателей состава гуминовых кислот и компактные непересекающиеся поля распределений показателей $H:C$, M_1 , E^{FK} каждой исследуемой нами почвы на уровне типа и подтипа;

- среди структурообразующих элементов и их соотношений, наиболее устойчивыми, статистически достоверным и надежным индикатором состояния природной среды в длительные промежутки времени является климатогенно обусловленная величина $H:C$, которая имеет тесные связи с климатическими показателями условий формирования почв, как на географо-территориальном уровне, так и локальном;

- ряд признаков состава, структурных особенностей и свойств гумусовых веществ и, как одного из их компонентов – гуминовых кислот, являются относительно устойчивыми в геологических масштабах времени: диагностированные комплексом методов палеопочвоведения и палеогеографии палеопочвы характеризуются и соответствующими величинами показателей состава, структуры и свойств ГК, о чем свидетельствуют массовые эмпирические материалы, показывающие аналогичные современным диапазоны изменений параметров ГК, а также многочисленные реконструкции, проведенные на объектах плиоцен–голоценового возраста разных условий распространения; без реконструкции ретроспективных трендов изменения природной среды невозможно разрабатывать прогнозы ее поведения при глобальном потеплении климата, а использование характеристик-индикаторов СГВ может способствовать решению этой проблемы.

Нельзя не остановиться еще на одном вопросе, от которого зависит интерпретация материалов и взаимопонимание работ друг друга разными исследователями – это разночтения в понятиях многих терминов. Ученые, занимающиеся разными проблемами Учения о гумусе почв, используют разные понятийные объемы большинства терминов, говорят на разных научных языках об одних и тех же характеристиках, свойствах, процессах, явлениях, связанных с гумусовыми веществами, и не могут понять друг друга. Сейчас понятия органическое вещество, перегной, гумус, а также гуминовые кислоты, фульвокислоты и гумин не имеют однозначных понятийных нагрузок. Этот вопрос обстоятельно обсужден в одной из последних обзорных работ, посвященных проблемам гуминовых веществ (Заварзина и др., 2021), поэтому здесь только обратим внимание на возможность и необходимость сохранения общепринятых понятий при решении вопросов в рамках экологического направления в Учении о гумусе почв, для которых требуются обобщения очень больших и разнообразных массивов данных, полученных и получаемых с применением традиционных методов, что обуславливает необходимость употребления традиционно используемых терминов. Что касается химического направления в Учении о гумусе почв, то дискуссионность большинства вопросов, разночтение многих терминов, обуславливает необходимость уточнения их при публикации материалов и их обсуждении. Вероятно, введение в статьи понятий, вкладываемых авторами в используемые термины, может облегчить восприятие материалов исследований разных авторов. В итоге, нужно сохранить традиционные понятия терминов (в том числе, и термина гумус) при решении проблем в рамках экологического направления, и уточнять понятийные объемы некоторых терминов, используемых при решении проблем, связанных с механизмом формирования системы гумусовых веществ, их химической структуры и свойств как природных веществ особого специфического класса химических соединений

У исследователей гумуса и гумусовых веществ еще много нерешенных вопросов, которые можно решать с традиционных позиций, но поиск новаторских подходов в аспекте методической составляющей исследований, безусловно, нужен. Как подчеркивают Baveye and Wander (2019), нужны междисциплинарные исследования, в частности, по их мнению, усилия микробиологов. Действительно, кооперация традиционных подходов с новыми методами и подходами из сопредельных наук естественнонаучного класса может дать возможность решения многочисленных проблем, стоящих перед исследователями в рамках экологического направления

в Учении о гумусе почв. Наибольшие перспективы, на наш взгляд, при решении большинства проблем и химического, и экологического направлений, имеет применение системного подхода, представляющего собой общенаучную парадигму. Кроме обозначенных в статье проблем, с этих позиций могут рассматриваться также наименее изученные вопросы, связанные со спецификой осуществления системой гумусовых веществ функций в разных условиях природной среды.

Основная биосферная функция гумуса, как и почвы в целом, заключается в создании условий менее зависимого от внешней среды и более устойчивого функционирования растительных сообществ, хотя эта целостная регуляторная функция может рассматриваться как совокупность функций более низкого порядка (аккумулятивной, депонирующей, иммобилизационной, физиологической и т.д.), которые в своей совокупности направлены на обеспечение устойчивости экосистем и биосферы в целом.

Информация о закономерностях поведения системы гумусовых веществ в меняющейся природной обстановке и реализации ими функций крайне нужна для управления состоянием экосистем и составления обоснованных прогнозов поведения почв и природной среды во времени, а потому унифицирование решений этих проблем остается актуальным и в XXI в.

В принципе, в Учении о гумусе почв намечается еще одно направление, которое включает широкий круг вопросов, отражающих возможности использования гумусовых веществ в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Но этот вопрос находится за пределами поставленных нами задач.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Статья выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова Л.Н. *Органическое вещество почвы и процессы его трансформации*. Л.: Наука, 1980. 288 с.
2. Алиев С.А. *Экология и энергетика биохимических процессов превращения органического вещества почв*. Баку: Изд-во ЭЛМ, 1978. 253 с.
3. Бажина Н.Л., Дергачева М.И. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот почв разных условий формирования // *Почвы и окружающая среда*. 2021. Том 4. № 4. e167. DOI: [10.31251/pos.v4i4.167](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167)
4. Бажина Н.Л., Захарова Е.Г., Дергачева М.И. Сравнительный анализ гумусовой составляющей тундровых почв Тувы и Горного Алтая, сформировавшихся в одинаковых экологических условиях // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2019. Том 43. № 4. С. 337–347. DOI:10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-347
5. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Период биологической активности и его связь групповым составом гумуса // *Биологические науки*. 1978. № 4. С. 115–119
6. Вакман С.А. *Гумус. Происхождение, химический состав и значение его в природе*. М.: Огиз-Сельхозгиз, 1937. 471 с.
7. Василевич Р.С., Лодыгин Е.Д., Безносиков В. А. Молекулярно-массовое распределение гумусовых веществ тундровых почв европейского северо-востока России // *Вестники Санкт-Петербургского университета. Сер. 3*. 2015. Вып. 4. С. 103–111.
8. Васильев В.А., Романовский Ю.М. *Процессы самоорганизации и проблемы моделирования* // Термодинамика и регуляция биологических процессов. М.: Наука, 1984. С. 184–204.
9. Вильямс В.Р. *Почвоведение*. Вып. 1. М.: Кн-во студентов Моск. с.-х. ин-та, 1914. 115 с.
10. Герман Р. О химическом исследовании черноземных почв, для определения различных свойств их, в южных губерниях // *Земледельческий журнал Московского общества сельского хозяйства*. 1836. № 5.
11. Герман Р. Химические исследования о черноземе, находящемся в южных губерниях России // *Земледельческий журнал Московского общества сельского хозяйства*. 1837. № 1.
12. Гришина Л.А. *Гумусообразование и гумусное состояние почв*. М.: Изд-во МГУ, 1986. 243 с.
13. *Гуминовые препараты*. Научные труды / М-во сельск. хоз-ва СССР. Тюмен. с.-х. ин-т. Т. 14. 1971. 265 с.
14. Дарвин Ч. *Образование почвенного слоя дождевыми червями и наблюдениями над их образом жизни* / Пер. с 5-го англ. Изд. М. Линдеман. М.: Изд. тип. С.П. Архипова, 1882. 204 с.
15. Дергачева М.И. *Новые подходы к реконструкции экологических условий обитания древних цивилизаций* // Россия и Восток: Проблемы взаимодействия: материалы Междунар. конф. Ч. 5. Кн. 2. Челябинск, 1995. С. 138–141.
16. Дергачева М.И. *Органическое вещество почв: статика и динамика*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 155 с.
17. Дергачева М.И. *Система гумусовых веществ почв (пространственные и временные аспекты)*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 113 с.
18. Дергачева М.И. *Археологическое почвоведение*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 231 с.

19. Дергачева М.И. *Эволюция регуляторной функции гумуса в процессе становления почвы как естественноисторического тела* // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию образования каф. почвоведения Иркутского гос. ун-та. Иркутск, 2001а. С. 36–38.
20. Дергачева М.И. *Гумус почвы: к вопросу поведения в меняющейся обстановке* // Экология и почвы. Избранные лекции X Всероссийской школы. Том IV. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001б. С. 29–39.
21. Дергачева М.И. *Экологические функции системы гумусовых веществ* // Вестник Томского государственного университета. Сер. Биологические науки (биология, почвоведение, лесоведение). 2003. № 8. С. 61–67.
22. Дергачева М.И. *Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 292 с.
23. Дергачева М.И., Васькович Н.В., Гранина Н.И. *Гумус и голоцен-плиоценовое почвообразование в Предбайкалье*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 204 с.
24. Дергачева М.И., Дервянко А.П., Феденева И.Н. *Эволюция позднелайстоцен-голоценового времени в Горном Алтае (реконструкция по педогенным признакам)*. Новосибирск: Изд-во ИГиЭ СО РАН, 2006. 144 с.
25. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. *Экологические функции почвы*. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
26. Докучаев В.В. *Русский чернозем*. Том 1. СПб. 1883. 376 с.
27. Дюшофур Ф. *Основы почвоведения. Эволюция почв*. М.: Прогресс, 1970. 591 с.
28. Заварзина А.Г., Данченко Н.Н., Демин В.В., Артемьева З.С., Козут Б.М. *Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор)* // Почвоведение. 2021. Том 12. С. 1449–1480.
29. Иванов А.Л., Козут Б.М., Семенов В.М., Тюрина Оберландер М., Ваксман Шанбахер Н. *Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней* // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 3–38.
30. *История учений о перегное* / Сб. важнейших работ. Сост. доц. Н.И. Саввиновым. Москва, Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1940. 416 с.
31. Ионенко В.И. *Колебательные процессы фракционного состава гумуса. Гумус как диссипативная система* // Тезисы докл. 2-го съезда почвоведов и агрохимиков УССР: пленарн. докл. почвоведов, мелиораторов. Харьков, 1986. С. 120.
32. Каллас Е.В. *Гумусовые профили почв озерных котловин Чулымо-Енисейской впадины*. Новосибирск: Изд-во «Гуманитарные технологии», 2004. 170 с.
33. Князев Д.А., Фокин А.Д., Очкин А.В. *Свободно-радикальная конденсация как естественный механизм образования гуминовых кислот* // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1061–1065.
34. Комиссаров И.Д., Логинов Л.Ф. *Молекулярная структура и реакционная способность ГК* // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 36–45.
35. Комов И.М. *О земледелии*. М.: Типография Пономарева, 1788. 378 с.
36. Кононова М.М. *Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения*. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 390 с.
37. Кононова М.М. *Органическое вещество почвы*. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 315 с.
38. Кононова М.М. *Проблема органического вещества почвы на современном этапе*. В кн.: Органическое вещество целинных и освоенных почв. М.: Наука. 1972. С. 7–29.
39. Костычев П.А. *Почвы черноземной области России, их происхождение, состав и свойства*. СПб.: Издание А.Ф. Девриена, 1886. 231 с.
40. Костычев П.А. *Образование и свойства перегноя* // Труды С.-Петербургского общества естествоиспытателей. 1889. Том 20. С. 123–168.
41. Костычев П.А. *О некоторых свойствах и составе перегноя* // Сельское хозяйство и лесоводство. 1890. № 10. С. 115–134.
42. Кудеярова А.Ю. *Приложение фундаментальных положений химии к пониманию механизмов образования и трансформации гумусовых веществ (обзор литературных и собственных экспериментальных данных)* // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1048–1063.
43. Лен Ж.М. *Супрамолекулярная химия: концепции и перспективы*. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с.
44. Лиштван И.И., Круглицкий Н.Н., Третинник В.Ю. *Физико-химическая механика гуминовых веществ*. Минск: Наука и техника, 1976. 263 с.
45. Лодыгин, Е.Д., Безносиков В.А. *Структурно-функциональные характеристики высокомолекулярных соединений почв по данным ¹³C-ЯМР и ЭПР спектроскопии* // Журнал прикладной химии. 2006. Том 79. № 9. С. 1494–1500.
46. Лодыгин, Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. *Изучение полидисперсности гумусовых веществ методом геля - хроматографии* // Доклады Россельхозакадемии. 2012. № 4. С. 24–27.
47. Мамонтов В.Г., Сюняев Н.К., Афанасьев Р.А. *Молекулярно-массовый состав гуминовых кислот обыкновенного чернозема при орошении* // Плодородие. 2009. № 3(48). С. 28–29.
48. Манская СМ., Кодина Л.А. *Ароматические структуры лигнина и их роль в образовании гуминовых кислот* // Почвоведение. 1968. № 8. С. 8–10.

49. Матвеева Н.В., Милановский Е.Ю., Рогова О.Б. Изменение гидрофобно-гидрофильных свойств органического вещества черноземов Каменной Степи // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2021. Вып. 106. С. 49–76. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-49-76
50. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 188 с.
51. Мильхеев Е.Ю. Количественная спектроскопия ^{13}C -ЯМР гуминовых кислот почв дельты р. Селенги // *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика*. 2017. № 4. С. 55–58.
52. Мистерски В., Логинов В. Исследование некоторых физико-химических свойств гуминовых кислот // *Почвоведение*. 1959. № 2. С. 39–51.
53. Морозов А.И. О связи периода биологической активности и глубины гумификации // *Почвоведение*. 1993. № 5. С. 118–120.
54. Новые методы исследования гуминовых кислот / Отв. ред. чл.-кор. АН СССР Г.Б. Еляков. Владивосток: АН СССР. Дальневост. науч. центр. Ин-т биол. активных веществ, 1972. 135 с.
55. Омелянский В.Л. О водородном брожении целлюлозы // *Архив биологических наук*. 1899. Том. VII. С. 423–449.
56. Омелянский В.Л. О применении бактериологического метода при химическом исследовании // *Архив биологических наук*. 1906. Том. XII. Вып. 3. С. 221–245.
57. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 334 с.
58. Орлов Д.С. Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гумусовых кислот // *Биологические науки*. 1977. № 9. С. 5.
59. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
60. Орлов Д.С. Свойства и функции гуминовых веществ. В книге: Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 16–27.
61. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 258 с.
62. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Рыжова И.М. Зависимость запасов гумуса от продолжительности периода биологической активности почв // *Почвоведение*. 1997. № 7. С. 818–822.
63. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 273 с.
64. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
65. Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гуминовых кислот. Автореф. дисс. ... д.х.н. М., 2000. 50 с.
66. Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // *Химия и жизнь*. 2008. № 1. С. 50–55.
67. Пономарева В.В. О методах выделения и химической природе фульвокислот // *Почвоведение*. 1947. № 12. С. 714–723.
68. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л.: Наука, 1980. 222 с.
69. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методика и некоторые результаты фракционирования гумуса черноземов // *Почвоведение*. 1968. № 11. С. 104–117.
70. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. 248 с.
71. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. М.: Наука, 1974. 279 с.
72. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
73. Степанов А.А. Получение амфифильных фракций гуминовых кислот и их характеристика // *Вестник Московского университета*. 2008. Том 17. № 3. С. 29–32.
74. Тихова В.Д., Фадеева В.П., Шакиров М.М., Юдина Н.В. Метрологические аспекты анализа гуминовых кислот // *Аналитика и контроль*. 2004. Том 8. № 4. С. 370–378.
75. Тихова В.Д., Фадеева В.П., Дергачева М.И., Шакиров М.М. Использование кислотного гидролиза для анализа состава гуминовых кислот разного генезиса // *Журнал прикладной химии*. 2008. Т. 81. № 11. С. 1841–1846.
76. Трусов А.Г. Гумификация соединений, входящих в состав растительных организмов. Петроград: Типография М.М. Стасюлевича, 1914. 34 с.
77. Трусов А.Г. О некоторых химико-биологических процессах, совершающихся при гумификации растительных остатков // *Журнал опытной агрономии*. 1916. Том. 17. С. 45–51.
78. Тюрин И.В. Материалы по сравнительному изучению методов определения органического углерода в почвах // *Проблемы современного почвоведения*. 1936. № 2. С. 212–150.
79. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.–Л.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.
80. Тюрин И.В. К вопросу о природе фульвокислот почвенного гумуса // *Труды Почвенного института АН СССР*, 1940. Т. 23. С. 21–33.

81. Тюрин И.В. *Географические закономерности гумусообразования*. В кн.: Труды юбилейной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения В.В. Докучаева. М.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 85–101.
82. Тюрин И.В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного перегноя или гумуса // *Труды Почвенного института имени В.В. Докучаева АН СССР*. 1951. Т. 38. С. 5–21.
83. Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Гумус как основа коллоидной составляющей почв // *Доклады Академии наук РФ*. 2007. Т. 415. № 6. С. 767–771.
84. Федотов Г.Н., Росете И.С., Рудометкина Т.Ф. Структурная организация гумусовых веществ в почвенных гелях // *Экологические системы и приборы*. 2011. № 11. С. 19–21.
85. Федотов Г.Н., Шоба С.А. Существующие представления о возможных путях формирования гумусовых веществ в почвах. // *Почвоведение*. 2013. № 12. С. 1523–1529.
86. Федотов Г.Н., Шоба С.А. О природе гуминовых веществ // *Почвоведение*. 2015. № 12. С. 1424–1432.
87. Фокин А.Д. Включение органического вещества и продуктов их разложения в гумусовые вещества почва // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1974. Вып. 6. С. 99–110.
88. Фокин А.Д. Динамическая характеристика гумусового профиля подзолистой почвы // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1975. Вып. 4. С. 80–88.
89. Фокин А.Д. Участие различных соединений растительных остатков в формировании и обновлении гумусовых веществ почвы. В кн.: Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 60–65.
90. Холодов В.А., Константинов А.И., Кудрявцев А.В., Перминова И.В. Строение гуминовых кислот почв зонального ряда по данным спектроскопии ЯМР ^{13}C // *Почвоведение*. 2011. № 9. С. 1064–1073.
91. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Константинов А.И., Перминова И.В. Препаративный выход и свойства гуминовых кислот при последовательных щелочных экстракциях // *Почвоведение*. 2015. № 10. С. 1222–1231.
92. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Жеребкер А.Я., Ярославцева Н.В. Оценка возможности применения аналитического двухстадийного пиролиза с хроматомасс-спектрометрией для изучения гуминовых веществ *in situ* // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2018. № 94. С. 3–18. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-94-3-18.
93. Чуков С.Н. *Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия*. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. 217 с.
94. Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В. Использование ^{13}C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 8. С. 952–964. DOI: 10.1134/S0032180X18080026
95. Шамшин А.А., Рыжова И.М. Зависимость гумусного состояния почв высокогорного профиля от климата // *Вестник Московского государственного университета. Сер. 17. Почвоведение*. 2000. № 1. С. 18–25.
96. Шевцова Л.К., Черников В.А., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Термическая характеристика и применение пиролитической масс-спектрометрии для исследования изменений свойств и структуры гуминовых кислот почв под влиянием удобрений. Сообщение 2 // *Агрохимия*. 2020. № 11. С. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188120110095
97. Шинкарев А.А., Гневашов С.Г. О химическом строении гумусовых веществ почв // *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1074–1082.
98. Ширинова Л.Т., Гиличинский Д.А., Остроумова Н.В., Ермолаев А.М. Применение методов оптической спектроскопии для исследования гуминовых веществ мерзлых толщ // *Криосфера Земли*. 2013. Т. 17. № 4. С. 94–104.
99. Ширинова Л.Т., Хомутова Т.Э., Ермолаев А.М. Исследование гуминовых веществ почвы методом флуоресцентной спектроскопии // *Агрохимия*. 2004. № 4. С. 78–85.
100. Шмук А.А. К вопросу о химической природе органического вещества почвы // *Бюллетень почвоведца*. 1930. № 5–7. С. 35–80.
101. Шмук А.А. *Исследования по биологической и агрономической химии*. Москва: Пищепромиздат, 1951. Т. 2. С. 271–309.
102. Эшби У. *Общая теория систем как новая научная дисциплина*. Исследования по общей теории систем: сб. переводов. М.: Прогресс, 1969. С. 125–142.
103. Abakumov E., Lodygin E., Tomashunas V. ^{13}C NMR and ESR characterization of humic substances isolated from soils of two Siberian Arctic Islands // *International Journal of Ecology*. 2015. Vol. 2015. Article ID 390591. P. 1–7.
104. Albers C.N., Banta G.T., Jacobsen O.S., Hansen P.E. Characterization and structural modelling of humic substances in field soil displaying significant differences from previously proposed structures // *European Journal of Soil Science*. 2008. Vol. 59. P. 693–705. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01036.x>
105. 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 Technique*. 2005. Vol. 66. P. 299–306. DOI: <https://doi.org/10.1002/jemt.20173>
106. Baigorri R., Fuentes M., Gonzfilez-Gaitano G., Garcia-Mina J.M. Simultaneous presence of diverse molecular patterns in humic substances in solution // *Journal of Physical Chemistry B*. 2007. Vol. 111. P. 10577–10582. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp0738154>

107. Baveye Ph.C., Wander M. The (bio)chemistry of soil humus and humic substances: why is the “New view” still considered novel after more than 80 years? // *Frontiers in Environmental Science*. 2019. Vol. 7. P. 27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027>
108. Burdon J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? // *Soil Science*. 2001. Vol. 166. P. 752–769. DOI: [10.1097/00010694-200111000-00004](https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00004)
109. Calderoni G., Schnitzer M. Effect of age on the Chemical structure of Paleosol Humic Acids and Fulvic Acids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2045–2051. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90385-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90385-5)
110. de Melo B.A.G., Motta F.L., Santana M.H.A. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments (review) // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 62. P. 967–974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>
111. Dell’Agnola G., Ferrari G. Effect of Humic acids on anion Uptake by excised Barley roots // *Proceedings of the International Symposium Humus et Planta V. Prague*. 1971. P. 567–570.
112. Dergacheva M. *Humic acids of soils of different age and genesis* // 10th International Meeting of the International Substances Society. Toulouse (France). 2000. P. 267–270.
113. Dergacheva M.I. Ecological Functions of Soil Humus // *Eurasian Soil Science*. 2001. Vol. 34. Suppl. 1. P. S100–S105.
114. Dou S., Shan J., Song X., Cao R., Wu M., Li Ch., Guan S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness // *Pedosphere*. 2020. Vol. 30(2). P. 159–167.
115. Durek M., Labaz B., Kabala C. Comparison of sequential extraction techniques and fractional composition of humic substances in chernozems and phaeozems of Poland – a review // *Soil Science Annual*. 2021. Vol. 72(1)132235. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.37501/soilsa/132235>
116. Felbeck G. T. Structural hypotheses of soil humic acids // *Soil Science*. 1971. Vol. III. No. 1. P. 42–48.
117. Flaig W. Chemische Untersuchungen an Humusstoffen // *Zeitschrift für Chemie*. 1964. Bd. 4. No. 7. P. 253–265.
118. Flaig W. Organic compounds in soil // *Soil Science*. 1971. Vol. 111. No. 1. P. 19–33.
119. Flaig W., Beutelspacher H., Rietz E. Chemical composition and physical properties of humic substances // *Soil Components*. Vol. 1. N.Y.: Springer-Verlag, 1975. P. 1–211.
120. Forsyth W.G.C. Studies on the more soluble complexes of soil organic matter // *Biochemical Journal*. 1947. Vol. 41. No. 2. P. 176–181.
121. Gautam R.K., Navaratna D., Muthukumar S., Singh A., More I.N. *Humic Substances: Its Toxicology, Chemistry and Biology Associated with Soil, Plants and Environment* // In book: Humic substances. Ed. by A. Makan. 2021. Ch. 6. P. 97–107. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98518>
122. Gerke J. Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: A review // *Agronomy*. 2018. Vol. 8(5). P. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy8050076>
123. Glaser B., Haumeier L., Guggenberger G., Zech W. The Terra preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics // *Naturwissenschaften*. 2001. Vol. 88. P. 37–41.
124. Hayes M.H.B., Swift R.S. An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances // *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18 (4). P. 1212–1231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1636-6>
125. Hayes M.H.B., Swift R.S. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water // *Advances in Agronomy*. 2020. Vol. 163. P. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.05.001>
126. Hoppe-Seyley F. Über Huminsubstanzen, ihre Entstehung und ihre Eigenschaften // *Ztschr. Physiol. Chem*. 1889. No. 13. P. 66–121.
127. Hsu P.-H., Hatcher P. Covalent coupling of peptides to humic acids: Structural effects investigated using 2D NMR spectroscopy // *Organic Geochemistry*. 2005. No. 12. P. 1694–1704.
128. Kelleher B.P., Simpson A.J. Humic substances in soils: are they really chemically distinct? // *Environmental Science & Technology*. 2006. Vol. 40. P. 4605–4611.
129. Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>
130. Kleber M., Lehmann J. Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems // *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48. P. 207–216. DOI: [10.2134/jeq2019.01.0036](https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036)
131. Kleinhempel D. Molecular structures of the humic substances // *Albrecht-Traer-Archiv*. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 3–10.
132. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2008. Vol. 171. P. 61–82. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>
133. Kononova M.M. *Soil Organic Matter; Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility*. Pergamon Press Ltd., Oxford, NY., 1966. 544 p.
134. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>

135. Man-Man Xia, Gui-Mei Dong, Ren-JieYang, Xiu-Chun Li, Qian Chen Study on fluorescence interaction between humic acid and PAHs based on two-dimensional correlation spectroscopy // *Journal of Molecular Structure*. 2020. Vol. 1217. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128428>
136. Martin R.P., Schneller J.M., Stahl J.C., Dirheimer G. Import of nuclear deoxyribonucleic acid coded lysine-accepting transfer ribonucleic acid (anticodon C-U-U) into yeast mitochondria // *American Chemical Society*. 1979. Vol. 21. P. 4600–4605.
137. Murphy B.W. *Soil organic matter and soil function – review of literature and underlying data*. Department of the Environment. Canberra. Australia, 2014. 155 p.
138. Nebbioso A., Piccolo A. Basis of a humeomics science: chemical fractionation and molecular characterization of humic biosuprastructures // *Biomacromolecules*. 2011. Vol. 12. No. 4. P. 1187–1199. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm101488e>
139. Nuzzo A., Piccolo A. Oxidative and photo-oxidative polymerization of humic suprastructures by heterogeneous biomimetic catalysis // *Biomacromolecules*. 2013. Vol. 14. No. 5. P. 1645–1652. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm400300m>
140. Oden S. Zur Kenntnis der Humussaure des Sphagnumtorfes. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft // Ztschr. Chem. Indust. Kolloid*. 1912. No. 10. P. 320–321.
141. Oden S. *Die Huminsauren*. Kolloidchem. Beihefte, 1919. Bd. 11. P. 3–9.
142. Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Fahrenhorst A., Senesi N. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters // *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48. P. 217–232. DOI: [10.2134/jeq2019.02.0041](https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041)
143. Orlov D.S., Sadovnikova L.K. *Soil Organic Matter and Protective Functions of Humic Substances in the Biosphere* // In book: *Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice*. Eds: Perminova I.V., Hatfield K., Hertkorn N. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences: SPRINGER. 2005. 53. P. 37–52.
144. Perminova I.V., Frimmel F.H., Kudryavtsev A.V., Kulikova N.A., Abbt-Braun G., Hesse S. Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation // *Environmental Science & Technology*. 2003. Vol. 37. No. 11. P. 2477–2485. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0258069>
145. Pauli F.W. *Soil Fertility: a biodynamical approach*. London: Hilger. 1967. 240 p.
146. Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances // *Soil Science*. 2001. Vol. 166. Is. 11. P. 810–832.
147. Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil sciences // *Advances in Agronomy*. 2002. Vol. 75. P. 57–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7)
148. 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 (23). P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2>
149. Piccolo A., Spaccini R., Savy D., Drosos M., Cozzolino V. *The Soil Humeome: Chemical Structure, Functions and Technological Perspective* // In book: *Sustainable Agrochemistry*, 2019. P. 183–222.
150. Preston C.M. Carbon-13 solid-state NMR of soil organic matter – Using the technique effectively // *Canadian Journal of Soil Science*. 2001. Vol. 81(3). P. 255–270. DOI: <https://doi.org/10.4141/S00-074>
151. Schaeffer A., Nannipieri P., Kästner M., Schmidt B., Botterweck J. From humic substances to soil organic matter – microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science // *Journal of Soils and Sediments* 2015. Vol. 15 (9). P. 1865–1881. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1177-4>
152. Schaumann G.E. Soilorganic matter beyond molecular structure. Part 1: Macromolecular and supramolecular characteristics // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2006. Vol. 169. P. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521785>
153. Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49–56.
154. Schnitzer M. Humic Substances: Chemistry and Reactions // *Developments in Soil Science*. 1978. Vol. 8. P. 1–64.
155. Schnitzer M. Soil organic matter: The next 75 years // *Soil Science*. 1991. Vol. 151. P. 41–58.
156. Schnitzer M., Khan S.U. *Humic Substances in the Environment*. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 1972. 327 p.
157. Schulten H.R. *A chemical structure for humic acid. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and pyrolysis-soft ionization mass spectrometry evidence* // In book: *Humic substances in the global environment and implications on human health / Senesi N., Miano T.M. (eds)*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. P. 43–56.
158. Schulten H.R. The three-dimensional structure of humic substances and soil organic matter studied by computational analytical chemistry // *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. 1995. Vol. 351. P. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00324293>
159. Shulten H. R., Schnitzer M. Chemical model structures for soil organic matter and soils // *Soil Science*. 1997. Vol. 162. No. 2. P. 115–130.

160. Schulten H.R., Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review // *Biology and Fertility of Soils*. 1998. No. 26. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050335>
161. Schulten R., Leinweber P. Characterization of humic and soil particles by analytical pyrolysis and computer modeling // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1996. Vol. 38. Iss. 1–2. P. 1–53. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(96\)00954-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(96)00954-0)
162. Schulten H.-R., Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure // *Biology and Fertility of Soils*. 2000. Vol. 30. P. 399–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050020>
163. Schumacher M., Christ I., Scheinos A., Jacobsen C., Kretzschmar R. Chemical Heterogeneity of Organic Soil Colloids Investigated by Scanning Transmission X-ray Microscopy and C-1s NEXAFS Microspectroscopy // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. No. 23. P. 9094–9100. DOI: <https://doi.org/10.1021/es050099f>
164. Schaumann G. Soil organic matter beyond molecular structure. Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2006. Vol. 169 (2). P. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521785>
165. Sirucek D., Kalina M., Klučáková M. Study of supramolecular structure of humic acids / Conference Proceedings, 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021). Sep. 2021 // *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2021. Vol. 2021. P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202134364>
166. Šmejkalová D., Piccolo A. Aggregation and Disaggregation of Humic Supramolecular Assemblies by NMR Diffusion Ordered Spectroscopy (DOSY-NMR) // *Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 42. No. 3. P. 699–706. DOI: <https://doi.org/10.1021/es071828p>
167. Sprengel C. Ueber Pflanzenhumus, Humussaure und humussaure Salze // *Archiv für die Gesamte Naturlehre*. 1826. Vol. 8. P. 145–220.
168. Sprengel C. *Die Bodenkunde oder die Lehre vom Boden: Analyse von 170 chemisch untersuchten Bodenarten aus Deutschland, Belgien, England, Frankreich, der Schweiz, Ungarn, Russland, Schweden, Ostindien, Westindien*. Leipzig, 1837. 576 p.
169. Stevenson F.J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. New York: John Wiley & Sons, 1982. 443 p.
170. Stevenson F.J. *Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. 2nd ed. New York; Chichester: John Wiley, 1994. 496 p.
171. Shiroya R., Kumada K. Combination reaction between humic acid and calcium ions // *Soil Science and Plant Nutrition*. 1976. Vol. 22 (3). P. 345–349.
172. Sutton R., Sposito G. Molecular structure in humic substances: The new view // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. P. 9009–9015. DOI: <https://doi.org/10.1021/es050778q>
173. Swift R.S. *Organic matter characterization*. Methods of soil analysis. P. 3. Chemical methods. Book Series: SSSA, Madison, WI. 1996. P. 1011–1069. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>
174. Swift R.S., Posner A.M. Autoxidation of humic acid under alkaline conditions // *Journal of Soil Science* 1972. Vol. 23 (4). P. 381–393. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1972.tb01669.x>
175. Ukalska-Jaruga A., Bejger R., Debaene G., Smreczak B. Characterization of Soil Organic Matter Individual Fractions (Fulvic Acids, Humic Acids, and Humins) by Spectroscopic and Electrochemical Techniques in Agricultural Soils // *Agronomy*. 2021. Vol. 11 (6). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061067>
176. Visser S.A. A Physico-Chemical Study of the Properties of Humic Acids and their changes during Humification // *Journal of Soil Science*. 1964. Vol. 15. P. 202–210. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb02219.x>
177. Wells M.J.M. Supramolecular answers to the organic matter controversy // *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48. P. 1644–1651. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0089>
178. Wershaw R.L. Model for humus in soils and sediments // *Environmental Science & Technology*. 1993. Vol. 27 (5). P. 814–816. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00042a603>
179. Wershaw R.L. *Evaluation of conceptual models of natural organic matter (humus) from a consideration of the chemical and biochemical processes of humification*. Scientific Investigations Report 2004-5121, U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, 2004. 44 p.

Поступила в редакцию 21.02.2022

Принята 23.02.2022

Опубликована 02.03.2022

Сведения об авторе:

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Россия, Новосибирск); mid555@yandex.ru, dergacheva@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

TRADITIONS AND INNOVATIONS IN SOIL HUMUS DOCTRINE

© 2021 M. I. Dergacheva 

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russia. E-mail: dergacheva@issa-siberia.ru

The purpose of the work. This article does not claim to be a complete review of the problems currently existing in the Doctrine of Soil Humus and reflected in numerous publications, but aims to present the author's vision of a number of aspects related to the possibilities of combining traditions and innovation - one of the general scientific methodological techniques - in the development of this scientific direction.

Methodology. The development and current state of two directions in the study of humus substances of soils – chemical and ecological - are considered. It is emphasized that within the framework of the chemical direction, the search for new (additional) techniques and methods is required to prove the specificity of the chemical structure of humus substances as an independent group of natural carbonaceous compounds. At this stage of research, the most promising may be the consideration of the mechanism of humus substances formation from the standpoint of supramolecular chemistry. The methodological basis for the interpretation of the research materials in the section devoted to the ecological direction is a systematic approach and theoretical provisions of soil ecology. It is proposed to preserve the traditional concepts of terms, including the term humus, when solving problems within the framework of the ecological direction, and to clarify the conceptual scope of some terms used in solving problems related to the mechanism of humus substances system formation, their chemical structure and properties as natural substances of a special specific class of chemical compounds within the framework of the chemical direction. In this article, when considering issues related to the understanding of the humus substances totality as a system, the terms humus and the system of humus substances are used as synonyms.

Main results and conclusions. It is proposed to consider humus and humus substances from the standpoint of different directions identified in the Doctrine of Soil Humus. Within the framework of the chemical direction, this soil component can be considered as a substance and as a natural open system. In the first case, humus and humus substances are studied on the basis of a reductionist approach and are interpreted on the basis of the laws, principles, and rules of traditional chemical fields, including the chemistry of natural compounds and polymer chemistry. The emergence of facts, statements, conclusions (which have not yet lost their significance and can relate to traditional ones) is traced at different stages of the development of the Doctrine of soil humus from the origins to the present time. The paradigm of the 20th century, which has not yet been supplanted by other concepts and dominant in modern times, classifies humus substances with a stable structural organization as carbon compounds with a variable composition and is considered as traditional. Consideration of humus substances totality as a complex natural self-organizing and self-regulating system requires other approaches to the study and interpretation of the materials obtained, which are based on a systematic approach that determines the comparison of monofactorial soil series, in each of which the objects of research differ in only one condition, property, chemical structure or function. It is necessary to continue studying the effect of alkaline extraction on the state of humic acids by previously applied and new methods, using the widest possible variety of monofactorial soil series of various natural and anthropogenic conditions of formation, and when a critical level of materials accumulates, it will be possible to draw an unambiguous conclusion and determine those conditions under which alkaline extraction should be excluded.

Key words: humus; humic acids; system of humus substances; chemical direction; ecological direction; traditional concepts and methods; new approaches and methods

How to cite: Dergacheva M.I. Traditions and innovations in soil humus doctrine // *The Journal of Soils and Environment*. 2021. 4(4). e172. doi: [10.31251/pos.v4i4.172](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Aleksandrova L.N. *Soil organic matter and processes of its transformation*. Leningrad: Nauka, 1980, 288 p. (in Russian)
2. Aliev S.A. *Ecology and energetics of biochemical processes of transformation of soil organic matter*. Baku: ELM Publishing House, 1978, 253 p. (in Russian)
3. Bazhina N.L., Dergacheva M.I. Fluorescent properties of soil humic acids of different formation conditions, *The Journal of Soils and Environment*, 2021, 4(4), e167. DOI: [10.31251/pos.v4i4.167](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167) (in Russian with English abstract)
4. Bazhina N.L., Zakharova E.G., Dergacheva M.I. Comparative analysis of tundra soil humus component of Tuva and mMountain Altai formed in the same environmental conditions, *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 2019, Vol. 43, No. 4, p. 337–347. DOI: [10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-347](https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-4-337-347) (in Russian)
5. Biryukova O.N., Orlov D.S. The period of biological activity and its connection with the group composition of humus, *Biology*, 1978, No. 4, p. 115–119. (in Russian)

6. Waksman S. *Humus. Origin, chemical composition and its significance in nature*. Moscow: SEL'KHOZGIZ, 1937, 470 p. (in Russian)
7. Vasilevich R.S., Lodygin E.D., Beznosikov V.A. Molecular-mass distribution of tundra soils humic substances from the European Northeast of Russia, *Vestniks of Saint Petersburg University, Ser. 3, 2015, Vol. 4, p. 103–111*. (in Russian)
8. Vasil'ev V.A., Romanovsky Yu.M. *Self-organization processes and modeling problems*. In book: Thermodynamics and regulation of biological processes. Moscow: Nauka, 1984, p. 184–204. (in Russian)
9. Williams W.R. *Soil science*. Iss. 1. Moscow: Book Publishing house of students of the Moscow Agricultural Institute, 1914, 115 p. (in Russian)
10. Herman R. On the chemical study of chernozem soils, to determine their various properties, in the southern provinces, *Agricultural Journal of the Moscow Society of Agriculture, 1836, No. 5*. (in Russian)
11. Herman R. Chemical research on the chernozem located in the southern provinces of Russia, *Agricultural journal of the Moscow Society of Agriculture, 1837, No. 1*. (in Russian)
12. Grishina L.A. *Humus formation and humus state of soils*. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1986, 243 p. (in Russian)
13. *Humic preparations. Scientific works / Ministry of agriculture. economy of the USSR*. Tyumen. agricultural institute, Vol. 14, 1971, 265 p. (in Russian)
14. Darwin Ch. *Formation of the soil layer by earthworms and observations of their way of life / Per. from the 5th English*. Ed. M. Lindeman. Moscow: ed. a type. S.P. Arkhipova, 1882, 204 p. (in Russian)
15. Dergacheva M.I. *New approaches to the reconstruction of the ecological conditions of ancient civilizations / Russia and the East: Problems of interaction: Proceedings of the International Conference. Part 5. Book. 2*. Chelyabinsk. 1995, p. 138–141. (in Russian)
16. Dergacheva M.I. *Soil organic matter: statics and dynamics*. Novosibirsk: Nauka, Sib. department, 1984, 155 p. (in Russian)
17. Dergacheva M.I. *The system of humic substances in soils*. Novosibirsk: Nauka, Sib. Department, 1989, 113 p. (in Russian)
18. Dergacheva M.I. *Archaeological pedology*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 1997, 231 p. (in Russian)
19. Dergacheva M.I. *Evolution of the regulatory function of humus in the process of formation of the soil as a natural-historical body*. In book: Soil as a connecting link in the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems: Proceedings of the Intern. Scientific-practical. Conf., dedicated 70th anniversary of the formation of the department. soil science Irkut. State. university Irkutsk, 2001a, p. 36–38. (in Russian)
20. Dergacheva M.I. *Soil humus: on the issue of behavior in a changing environment*. Ecology and soils. Selected lectures of the X Russian School. Vol. IV. Pushchino: ONTI PNT RAS, 2001b, p. 29–39. (in Russian)
21. Dergacheva M.I. Ecological functions of the system of humic substances, *Tomsk State University Journal. Ser. Biological sciences (biology, soil science, forest science), 2003, No. 8, p. 61–67*. (in Russian)
22. Dergacheva M.I. *The system of humic substances as a basis for the diagnosis of paleosols and the reconstruction of the paleo-natural environment*. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2018, 292 p. (in Russian)
23. Dergacheva M.I., Vashukevich N.V., Granina N.I. *Humus and Holocene-Pleocene soil formation in Predbaikalia*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2000, 204 p. (in Russian)
24. Dergacheva M.I., Derevianko A.P., Fedeneva I.N. *Evolution of the Late Pleistocene-Holocene time in Gorny Altai (reconstruction based on pedogenic features)*. Novosibirsk: SB RAS, 2006, 144 p. (in Russian)
25. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ecological functions of the soil*. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1986, 136 p. (in Russian)
26. Dokuchaev V.V. *Russian black earth*. Vol. 1. St. Petersburg, 1883, 376 p. (in Russian)
27. Dushofur F. *Fundamentals of soil science. Soil evolution*. Moscow: Progress, 1970, 591 p. (in Russian)
28. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M. Humic Substances – Hypotheses and Reality (Review), *Pochvovedenie, 2021, Vol. 12, p. 1449–1480*. (in Russian)
29. Ivanov A.L., Kogut B.M., Semenov V.M., Tyurina Oberlander M., Vaksman N. The development of theory on humus and soil organic matter: from Turin and Waksman to present day, *Dokuchaev Soil Bulletin, 2017, Iss. 90, p. 3–38*. (in Russian)
30. *The history of the doctrine of humus. Book of the most important works. Comp. Assoc. N.I. Savvinov. Moscow, Leningrad: Acad. sciences of the USSR, 1940, 416 p.* (in Russian)
31. Ionenko V.I. *Oscillatory processes of the fractional composition of humus. Humus as a dissipative system*, Abstracts of reports. 2nd Congress of Soil Scientists and Agrochemists of the Ukrainian SSR: Plenar. report soil scientists, land reclaimators. Kharkov, 1986, p. 120. (in Russian)
32. Kallas E.V. *Humus soil profiles lake basins Chulym-Yenisei depression*. Novosibirsk: “Humanitarian Technologies”, 2004, 170 p. (in Russian)
33. Knyazev D.A., Fokin A.D., Ochkin A.V. Aree-radical condensation as a natural mechanism of the formation of humic acids, *Pochvovedenie, 2009, Vol. 42, No. 9, p. 984–988*. (in Russian)
34. Komissarov, I.D. Loginov L.F. *Molecular structure and reactivity of HA*. In book: Humic substances in the biosphere. Moscow: Nauka, 1993, p. 36–45. (in Russian)

35. Komov I.M. *About agriculture*. Moscow: Printing House, 1788, 378 p.
36. Kononova M.M. *The problem of soil humus and modern problems of its study*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1951, 390 p. (in Russian)
37. Kononova M.M. *Soil organic matter*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, 315 p. (in Russian)
38. Kononova M.M. *The problem of soil organic matter at the present stage*. In book: Organic substance of virgin and developed soils. Moscow: Nauka, 1972, p. 7–29. (in Russian)
39. Kostychev P.A. *Soils of the chernozem region of Russia, their origin, composition and properties*. St. Petersburg: A.F. Devrien, 1886, 231 p. (in Russian)
40. Kostychev P.A. Formation and properties of humus, *Proceedings of the St. Petersburg Society of Naturalists, 1889, Vol. 20, p. 123–168*. (in Russian)
41. Kostychev P.A. On some properties and composition of humus, *Agriculture and Forestry, 1890, No. 10, p. 115–134*. (in Russian)
42. Kudayarova A.Yu. Application of the fundamental principles of chemistry to understanding the mechanisms of formation and transformation of humic substances (a review of the literature and our own experimental data), *Pochvovedenie, 2007, No. 9, p. 1048–1063*. (in Russian)
43. Len J.M. *Supramolecular chemistry: concepts and perspectives*. Novosibirsk: Nauka, 1998, 334 p. (in Russian)
44. Lishtvan I.I., Kruglitsky N.N., Tretinnik V.Yu. *Physical and chemical mechanics of humic substances*. Minsk: Science and technology, 1976, 263 p. (in Russian)
45. Lodygin E.D., Beznosikov V.A. ¹³C NMR and ESR study of structural and functional group characteristics of macromolecular compounds of soils, *Russian Journal of Applied Chemistry, 2006, Vol. 79, No. 9, p. 1478–1484*. (in Russian)
46. Lodygin E.D., Beznosikov V.A. The study of the polydispersity of humic substances by gel chromatography, *Reports of the Russian Agricultural Academy, 2012, No. 4, p. 24–27*. (in Russian)
47. Mamontov V.G., Sunyaev N.K., Afanasiev R.A. Molecular and mass composition of humic acids of ordinary chernozem under irrigation, *Plodorodie, 2009, No. 3 (48), p. 28–29*. (in Russian)
48. Manskaya S.M., Kodina L.A. Aromatic structures of lignin and their role in the formation of humic acids, *Pochvovedenie, 1968, No. 8, p. 8–10*. (in Russian)
49. Matveeva N.V., Milanovsky E. Yu., Rogova O.B. Hanges in the hydrophobic-hydrophilic properties of the organic matter of the chernozems of the kamennaya steppe, *Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, Iss. 106, p. 49–76*. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-106-49-76 (in Russian)
50. Milanovsky E.Yu. *Soil humus substances as natural hydrophobic-hydrophilic compounds*. Moscow: GEOS, 2009, 188 p. (in Russian)
51. Milheev E.Yu. Quantitative ¹³C-NMR spectroscopy of humic acids in soils of the delta of the river. Selengi, *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics, 2017, No. 4, p. 55–58*. (in Russian)
52. Misterski V., Loginov V. Investigation of some physicochemical properties of humic acids, *Pochvovedenie, 1959, No. 2, p. 39–51*. (in Russian)
53. Morozov A.I. On the relationship between the period of biological activity and the depth of humification, *Pochvovedenie, 1993, No. 5, p. 118–120*. (in Russian)
54. *New methods for the study of humic acids*. Ed. ed. Corresponding Member Academy of Sciences of the USSR G.B. Elyakov. Vladivostok: USSR Academy of Sciences. Far East. scientific Centre. Institute of Biol. active substances, 1972, 135 p. (in Russian)
55. Omelyansky V.L. On hydrogen fermentation of cellulose, *Archive of Biological Sciences, 1899, Vol. VII, p. 423–449*. (in Russian)
56. Omelyansky V.L. On the application of the bacteriological method in chemical research, *Archive of Biological Sciences, 1906, Vol. XII, Iss. 3, p. 221–245*. (in Russian)
57. Orlov D.S. *Soil humic acids*. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1974, 334 p. (in Russian)
58. Orlov D.S. Kinetic theory of humification and the scheme of the probable structure of humic acids, *Biology, 1977, No. 9, p. 5*. (in Russian)
59. Orlov D.S. *Soil humic acids and the general theory of humification*. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1990, 325 p. (in Russian)
60. Orlov D.S. *Properties and functions of humic substances*. In book: Humic substances in the biosphere. Moscow: Nauka, 1993, p. 16–27. (in Russian)
61. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. *Organic matter of soils of the Russian Federation*. Moscow: Nauka, 1996, 258 p. (in Russian)
62. Orlov D.S., Biryukova O.N., Ryzhova I.M. Dependence of humus reserves on the duration of the period of soil biological activity, *Pochvovedenie, 1997, No. 7, p. 818–822*. (in Russian)
63. Orlov D.S., Grishina L.A. *Workshop on the chemistry of humus*. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1981, 273 p. (in Russian)
64. *Soil Memory: Soil as a Memory of Biosphere-Geosphere-Anthroposphere Interactions*. Moscow: LKI Publishing House, 2008, 692 p. (in Russian)

65. Perminova I.V. *Analysis, classification and prediction of the properties of humic acids*: Abstract of Dissertation ... Doc. of Chem. Sci. Moscow, 2000, 50 p. (in Russian)
66. Perminova I.V. Humic substances – a challenge to chemists of the XXI century, *Chemistry and Life*, 2008, No. 1, p. 50–55. (in Russian)
67. Ponomareva V.V. On the methods of isolation and chemical nature of flvic acids, *Pochvovedenie*, 1947, No. 12. p. 714–723. (in Russian)
68. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Humus and soil formation (methods and results of the study)*. Leningrad: Nauka, 1980, 222 p. (in Russian)
69. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Method and some results of chernozem humus fractionation, *Pochvovedenie*, 1968, No. 11, p. 104–117. (in Russian)
70. Popov A.I. *Humic substances: properties, structure, formation*. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2004, 248 p. (in Russian)
71. Sadovsky V.N. *Foundations of the general theory of systems. Logical and methodological analysis*. Moscow: Nauka, 1974, 279 p. (in Russian)
72. Semenov V.M., Kogut B.M. *Soil organic matter*. Moscow: GEOS, 2015, 233 p. (in Russian)
73. Stepanov A.A. Eparating and characterizing of the amphiphilic fractions of humic acids, *Bulletin of Moscow University*, 2008, Vol. 17, No. 3, p. 29–32. (in Russian)
74. Tikhova V.D., Fadeeva V.P., Shakirov M.M., Yudina N.V. Metrological aspects of the analysis of humic acids, *Analytics and Control*, 2004, Vol. 8, No. 4, p. 370–378. (in Russian)
75. Tikhova V.D., Fadeeva V.P., Dergacheva M.I., Shakirov M.M. The use of acid hydrolysis to analyze the composition of humic acids of different genesis, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, Vol. 81, No. 11, p. 1841–1846. (in Russian)
76. Trusov A.G. *Humification of compounds that make up plant organisms*. Petrograd: Printing house M.M. Stasyulevich type. MM. Stasyulevich, 1914, 34 p. (in Russian)
77. Trusov A.G. On some chemical and biological processes occurring during the humification of plant residues, *Journal of Experimental Agronomy*, 1916, Vol. 17, p. 45–51. (in Russian)
78. Tyurin I.V. Materials on the comparative study of methods for determining organic carbon in soils, *Problems of Modern Soil Science*, 1936, No. 2, p. 212–150. (in Russian)
79. Tyurin I.V. *Organic matter of soils and its role in soil formation and fertility. The doctrine of soil humus*. Moscow –Leningrad: Sel'khozgiz, 1937, 287 p. (in Russian)
80. Tyurin I.V. To the question of the nature of fulvic acids in soil humus, *Tr. Soil Institute of the Academy of Sciences of the USSR*, 1940, Vol. 23, p. 21–33. (in Russian)
81. Tyurin I.V. *Geographic patterns of humus formation*. In book: Proceedings of the anniversary session, dedicated. 100th anniversary of the birth of V.V. Dokuchaev. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1949, p. 85–101. (in Russian)
82. Tyurin I.V. To the method of analysis for comparative study of the composition of soil humus or humus, *Tr. Soil institute V.V. Dokuchaev Academy of Sciences of the USSR*, 1951, Vol. 38, p. 5–21. (in Russian)
83. Fedotov G.N., Dobrovolsky G.V. Humus as the basis of the colloidal component of soils, *Doklady Akademii Nauk of the Russian Federation*, 2007, Vol. 415, No. 6, p. 767–771. (in Russian)
84. Fedotov G.N., Rosete I.S., Rudometkina T.F. Structural organization of humic substances in soil gels, *Ecological Systems and Devices*, 2011, No. 11, p. 19–21. (in Russian)
85. Fedotov G.N., Shoba S.A. Existing ideas about possible ways of formation of humic substances in soils, *Pochvovedenie*, 2013, No. 12, p. 1523–1529. (in Russian)
86. Fedotov G.N., Shoba S.A. On the nature of humic substances, *Pochvovedenie*, 2015, No. 12, p. 1424–1432. (in Russian)
87. Fokin A.D. *Incorporation of organic matter and their decomposition products into soil humic substances*, *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 1974, Iss. 6, p. 99–110. (in Russian)
88. Fokin A.D. Dynamic characteristics of the humus profile of podzolic soil, *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 1975, Iss. 4, p. 80–88. (in Russian)
89. Fokin A.D. *Participation of various compounds of plant residues in the formation and renewal of soil humic substances*. In book: Problems of Soil Science. Moscow: Nauka, 1978, p. 60–65. (in Russian)
90. Kholodov V.A., Konstantinov A.I., Kudryavtsev A.V., Perminova I.V. Structure of humic acids in zonal soils according to ¹³C NMR spectroscopy data, *Pochvovedenie*, 2011, No. 9, p. 1064–1073. (in Russian)
91. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Konstantinov A.I., Perminova I.V. Preparative yield and properties of humic acids in successive alkaline extractions, *Pochvovedenie*, 2015, No. 10, p. 1222–1231. (in Russian)
92. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Zherebker A.Ya., Yaroslavtseva N.V. Evaluation of the possibility of using analytical two-stage pyrolysis with chromato-mass spectrometry for the study of humic substances in situ, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, No. 94, p. 3–18. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-94-3-18. (in Russian)
93. Chukov S.N. *Structural and functional parameters of soil organic matter under anthropogenic impact*. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2001, 217 p. (in Russian)
94. Chukov S.N., Lodygin E.D., Abakumov E.V. Application of ¹³C NMR spectroscopy to the study of soil organic, *Pochvovedenie*, 2018, No. 8, p. 952–964. DOI: 10.1134/S0032180X18080026 (in Russian)

95. Shamshin A.A., Ryzhova I.M. Dependence of the humus state of high-mountain soils on climate, *Bulletin of Moscow State University. Ser. 17. Soil Science*, 2000, No. 1, p. 18–25. (in Russian)
96. Shevtsova L.K., Chernikov V.A., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I. Thermal characterization and application of pyrolytic mass spectrometry to study changes in the properties and structure of soil humic acids under the influence of fertilizers. *Message 2, Agrokhimia*, 2020, No. 11, p. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188120110095 (in Russian)
97. Shinkarev A.A., Gnevashov S.G. The chemical structure of humic substances soils, *Pochvovedenie*, 2001, No. 9, p. 1074–1082. (in Russian)
98. Shirshova L.T., Gilichinskiy D.A., Ostroumova N.V., Ermolaev A.M. Application of optical spectroscopy methods for the study of humic substances in frozen strata, *Earth's Cryosphere*, 2013, Vol. 17, No. 4, p. 94–104. (in Russian)
99. Shirshova L.T., Khomutova T.E., Ermolaev A.M. Study of soil humic substances by fluorescence spectroscopy, *Agrokhimia*, 2004, No. 4, p. 78–85. (in Russian)
100. Shmuk A.A. On the question of the chemical nature of soil organic matter, *Bulletin of a soil scientist*, 1930, No. 5–7, p. 35–80. (in Russian)
101. Shmuk A.A. *Studies in biological and agronomic chemistry*. Moscow: Pishchepromizdat, 1951, Vol. 2, p. 271–309. (in Russian)
102. Ashby W. *General systems theory as a new scientific discipline*. Studies in General Systems Theory: Sat. translations. Moscow: Progress, 1969, p. 125–142. (in Russian)
103. Abakumov E., Lodygin E., Tomashunas V. ¹³C NMR and ESR characterization of humic substances isolated from soils of two Siberian Arctic Islands, *International Journal of Ecology*, 2015, Vol. 2015, Article ID 390591, p. 1–7.
104. Albers C.N., Banta G.T., Jacobsen O.S., Hansen P.E. Characterization and structural modelling of humic substances in field soil displaying significant differences from previously proposed structures, *European Journal of Soil Science*, 2008, Vol. 59, p. 693–705. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01036.x>
105. 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 Technique*, 2005, Vol. 66, p. 299–306. DOI: <https://doi.org/10.1002/jemt.20173>
106. Baigorri R., Fuentes M., Gonzfilez-Gaitano G., Garcia-Mina J.M. Simultaneous presence of diverse molecular patterns in humic substances in solution, *Journal of Physical Chemistry B*, 2007, Vol. 111, p. 10577–10582. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp0738154>
107. Baveye Ph.C., Wander M. The (bio)chemistry of soil humus and humic substances: why is the “New view” still considered novel after more than 80 years? *Frontiers in Environmental Science*, 2019, Vol. 7, p. 27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027>
108. Burdon J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? *Soil Science*, 2001, Vol. 166, p. 752–769. DOI: [10.1097/00010694-200111000-00004](https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00004)
109. Calderoni G., Schnitzer M. Effect of age on the Chemical structure of Paleosol Humic Acids and Fulvic Acids, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, Vol. 48, p. 2045–2051. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90385-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90385-5)
110. de Melo B.A.G., Motta F.L., Santana M.H.A. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments (review), *Materials Science and Engineering: C*, 2016, Vol. 62, p. 967–974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>
111. Dell'Agnola G., Ferrari G. Effect of Humic acids on anion Uptake by excised Barley roots, *Proceedings of the International Symposium Humus et Planta V. Prague*, 1971, p. 567–570.
112. Dergacheva M. *Humic acids of soils of different age and genesis*, 10th International Meeting of the International Substances Society, Toulouse (France), 2000. p. 267–270.
113. Dergacheva M.I. Ecological Functions of Soil Humus, *Eurasian Soil Science*, 2001, Vol. 34, Suppl. 1, p. S100–S105.
114. Dou S., Shan J., Song X., Cao R., Wu M., Li Ch., Guan S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness, *Pedosphere*, 2020, Vol. 30(2), p. 159–167.
115. Durek M., Labaz B., Kabala C. Comparison of sequential extraction techniques and fractional composition of humic substances in chernozems and phaeozems of Poland – a review, *Soil Science Annual*, 2021, Vol. 72(1)132235, p. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.37501/soilsa/132235>
116. Felbeck G. T. Structural hypotheses of soil humic acids, *Soil Science*, 1971, Vol. III, No. 1, p. 42–48.
117. Flaig W. Chemische Untersuchungen an Humusstoffen, *Zeitschrift für Chemie*, 1964, Bd. 4, No. 7, p. 253–265.
118. Flaig W. Organic compounds in soil, *Soil Science*, 1971, Vol. 111, No. 1, p. 19–33.
119. Flaig W., Beutelspacher H., Rietz E. Chemical composition and physical properties of humic substances, *Soil Components*, Vol. 1, N.Y.: Springer-Verlag, 1975, p. 1–211.
120. Forsyth W.G.C. Studies on the more soluble complexes of soil organic matter, *Biochemical Journal*, 1947, Vol. 41, No. 2, p. 176–181.

121. Gautam R.K., Navaratna D., Muthukumar S., Singh A., More I.N. *Humic Substances: Its Toxicology, Chemistry and Biology Associated with Soil, Plants and Environment*. In book: Humic substances. Ed. by A. Makan, 2021, Ch. 6, p. 97–107. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98518>
122. Gerke J. Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: A review, *Agronomy*, 2018, Vol. 8(5), p. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy8050076>
123. Glaser B., Haumeier L., Guggenberger G., Zech W. The Terra preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics, *Naturwissenschaften*, 2001, Vol. 88, p. 37–41.
124. Hayes M.H.B., Swift R.S. An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances, *Journal of Soils and Sediments*, 2018, Vol. 18 (4), p. 1212–1231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1636-6>
125. Hayes M.H.B., Swift R.S. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water, *Advances in Agronomy*, 2020, Vol. 163, p. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.05.001>
126. Hoppe-Seyler F. Über Huminsubstanzen, ihre Entstehung und ihre Eigenschaften, *Ztschr. Physiol. Chem.*, 1889, No. 13, p. 66–121.
127. Hsu P.-H., Hatcher P. Covalent coupling of peptides to humic acids: Structural effects investigated using 2D NMR spectroscopy, *Organic Geochemistry*, 2005, No. 12, p. 1694–1704.
128. Kelleher B.P., Simpson A.J. Humic substances in soils: are they really chemically distinct? *Environmental Science & Technology*, 2006, Vol. 40, p. 4605–4611.
129. Kleber M. The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, p. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>
130. Kleber M., Lehmann J. Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems, *Journal of Environmental Quality*, 2019, Vol. 48, p. 207–216. DOI: [10.2134/jeq2019.01.0036](https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036)
131. Kleinhempel D. Molecular structures of the humic substances, *Albrecht-Traer-Archiv*, 1970, Vol. 14, No. 1, p. 3–10.
132. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, Vol. 171, p. 61–82. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>
133. Kononova M.M. *Soil Organic Matter; Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility*. Pergamon Press Ltd., Oxford, NY., 1966, 544 p.
134. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, p. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>
135. Man-Man Xia, Gui-Mei Dong, Ren-JieYang, Xiu-Chun Li, Qian Chen Study on fluorescence interaction between humic acid and PAHs based on two-dimensional correlation spectroscopy, *Journal of Molecular Structure*, 2020, Vol. 1217, p. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128428>
136. Martin R.P., Schneller J.M., Stahl J.C., Dirheimer G. Import of nuclear deoxyribonucleic acid coded lysine-accepting transfer ribonucleic acid (anticodon C-U-U) into yeast mitochondria, *American Chemical Society*, 1979, Vol. 21, p. 4600–4605.
137. Murphy B.W. *Soil organic matter and soil function – review of literature and underlying data*. Department of the Environment, Canberra, Australia, 2014, 155 p.
138. Nebbioso A., Piccolo A. Basis of a humeomics science: chemical fractionation and molecular characterization of humic biosuprastructures, *Biomacromolecules*, 2011, Vol. 12, No. 4, p. 1187–1199. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm101488e>
139. Nuzzo A., Piccolo A. Oxidative and photo-oxidative polymerization of humic suprastructures by heterogeneous biomimetic catalysis, *Biomacromolecules*, 2013, Vol. 14, No. 5, p. 1645–1652. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm400300m>
140. Oden S. Zur Kenntnis der Humussaure des Sphagnumtorfes. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, Ztschr. Chem. Indust. Kolloid.*, 1912, No. 10, p. 320–321.
141. Oden S. *Die Huminsauren*. Kolloidchem. Beihefte, 1919, Bd. 11, p. 3–9.
142. Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Fahrenhorst A., Senesi N. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters, *Journal of Environmental Quality*, 2019, Vol. 48, p. 217–232. DOI: [10.2134/jeq2019.02.0041](https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041)
143. Orlov D.S., Sadovnikova L.K. *Soil Organic Matter and Protective Functions of Humic Substances in the Biosphere*. In book: Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice. Eds: Perminova I.V., Hatfield K., Hertkorn N. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences: SPRINGER, 2005, 53, p. 37–52.
144. Perminova I.V., Frimmel F.H., Kudryavtsev A.V., Kulikova N.A., Abbt-Braun G., Hesse S. Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation, *Environmental Science & Technology*, 2003, Vol. 37, No. 11, p. 2477–2485. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0258069>
145. Pauli F.W. *Soil Fertility: a biodynamical approach*. London: Hilger, 1967, 240 p.
146. Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances, *Soil Science*, 2001, Vol. 166, Iss. 11, p. 810–832.

147. Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil sciences, *Advances in Agronomy*, 2002, Vol. 75, p. 57–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7)
148. 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 (23). P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2>
149. Piccolo A., Spaccini R., Savy D., Drosos M., Cozzolino V. *The Soil Humeome: Chemical Structure, Functions and Technological Perspective*. In book: Sustainable Agrochemistry, 2019, p. 183–222.
150. Preston C.M. Carbon-13 solid-state NMR of soil organic matter – Using the technique effectively, *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, Vol. 81(3), p. 255–270. DOI: <https://doi.org/10.4141/S00-074>
151. Schaeffer A., Nannipieri P., Kästner M., Schmidt B., Botterweck J. From humic substances to soil organic matter – microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science, *Journal of Soils and Sediments* 2015, Vol. 15 (9), p. 1865–1881. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1177-4>
152. Schaumann G.E. Soilorganic matter beyond molecular structure. Part 1: Macromolecular and supramolecular characteristics, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169, p. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521785>
153. Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 2011, Vol. 478, p. 49–56.
154. Schnitzer M. Humic Substances: Chemistry and Reactions, *Developments in Soil Science*, 1978⁶, Vol. 8, p. 1–64.
155. Schnitzer M. Soil organic matter: The next 75 years, *Soil Science*, 1991, Vol. 151, p. 41–58.
156. Schnitzer M., Khan S.U. *Humic Substances in the Environment*. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 1972, 327 p.
157. Schulten H.R. A chemical structure for humic acid. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and pyrolysis-soft ionization mass spectrometry evidence. In book: Humic substances in the global environment and implications on human health / Senesi N., Miano T.M. (eds). Amsterdam: Elsevier Science, 1994, p. 43–56.
158. Schulten H.R. The three-dimensional structure of humic substances and soil organic matter studied by computational analytical chemistry, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1995, Vol. 351, p. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00324293>
159. Shulten H. R., Schnitzer M. Chemical model structures for soil organic matter and soils, *Soil Science*, 1997, Vol. 162, No. 2, p. 115–130.
160. Schulten H.R., Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review, *Biology and Fertility of Soils*, 1998, No. 26, p. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050335>
161. Schulten R., Leinweber P. Characterization of humic and soil particles by analytical pyrolysis and computer modeling, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1996, Vol. 38, Iss. 1–2, p. 1–53. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(96\)00954-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(96)00954-0)
162. Schulten H.-R., Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure, *Biology and Fertility of Soils*, 2000, Vol. 30, p. 399–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050020>
163. Schumacher M., Christ I., Scheinos A., Jacobsen C., Kretzschmar R. Chemical Heterogeneity of Organic Soil Colloids Investigated by Scanning Transmission X-ray Microscopy and C-1s NEXAFS Microspectroscopy, *Environmental Science & Technology*, 2005, Vol. 39, No. 23, p. 9094–9100. DOI: <https://doi.org/10.1021/es050099f>
164. Schaumann G. Soil organic matter beyond molecular structure. Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169 (2), p. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200521785>
165. Sirucek D., Kalina M., Klučáková M. Study of supramolecular structure of humic acids / Conference Proceedings, 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021). Sep. 2021, *European Association of Geoscientists & Engineers*, 2021, Vol. 2021, p. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202134364>
166. Šmejkalová D., Piccolo A. Aggregation and Disaggregation of Humic Supramolecular Assemblies by NMR Diffusion Ordered Spectroscopy (DOSY-NMR), *Environmental Science & Technology*, 2008, Vol. 42, No. 3, p. 699–706. DOI: <https://doi.org/10.1021/es071828p>
167. Sprengel C. Ueber Pflanzenhumus, Humussaure und humussaure Salze, *Archiv für die Gesamte Naturlehre*, 1826, Vol. 8, p. 145–220.
168. Sprengel C. *Die Bodenkunde oder die Lehre vom Boden: Analyse von 170 chemisch untersuchten Bodenarten aus Deutschland, Belgien, England, Frankreich, der Schweiz, Ungarn, Russland, Schweden, Ostindien, Westindien*. Leipzig, 1837, 576 p.
169. Stevenson F.J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. New York: John Wiley & Sons, 1982, 443 p.
170. Stevenson F.J. *Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. 2nd ed. New York; Chichester: John Wiley, 1994, 496 p.
171. Shiroya R., Kumada K. Combination reaction between humic acid and calcium ions, *Soil Science and Plant Nutrition*, 1976, Vol. 22 (3), p. 345–349.

172. Sutton R., Sposito G. Molecular structure in humic substances: The new view, *Environmental Science & Technology*, 2005, Vol. 39, p. 9009–9015. DOI: <https://doi.org/10.1021/es050778q>
173. Swift R.S. *Organic matter characterization*. Methods of soil analysis. P. 3. Chemical methods. Book Series: SSSA, Madison, WI, 1996, p. 1011–1069. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>
174. Swift R.S., Posner A.M. Autoxidation of humic acid under alkaline conditions, *Journal of Soil Science*, 1972, Vol. 23 (4), p. 381–393. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1972.tb01669.x>
175. Ukalska-Jaruga A., Bejger R., Debaene G., Smreczak B. Characterization of Soil Organic Matter Individual Fractions (Fulvic Acids, Humic Acids, and Humins) by Spectroscopic and Electrochemical Techniques in Agricultural Soils, *Agronomy*, 2021, Vol. 11 (6), p. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061067>
176. Visser S.A. A Physico-Chemical Study of the Properties of Humic Acids and their changes during Humification, *Journal of Soil Science*, 1964, Vol. 15, p. 202–210. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb02219.x>
177. Wells M.J.M. Supramolecular answers to the organic matter controversy, *Journal of Environmental Quality*, 2019, Vol. 48, p. 1644–1651. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0089>
178. Wershaw R.L. Model for humus in soils and sediments, *Environmental Science & Technology*, 1993, Vol. 27 (5), p. 814–816. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00042a603>
179. Wershaw R.L. *Evaluation of conceptual models of natural organic matter (humus) from a consideration of the chemical and biochemical processes of humification*. Scientific Investigations Report 2004-5121, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2004, 44 p.

Received 21 February 2022

Accepted 23 February 2022

Published 02 March 2022

About the author:

Dergacheva Maria Ivanovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher of the Laboratory of Biogeocenology of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science (Novosibirsk, Russia); mid555@yandex.ru; dergacheva@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



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