

### Химия почв

Е. В. Абакумов, В.И. Поляков, С.Н. Чуков Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773-772.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070024>

Создание карбоновых полигонов для мониторинга процессов эмиссии и депонирования соединений углерода в наземных экосистемах является одной из приоритетных задач в области сохранения климата и биосферы в целом. Особенно велика роль почв, которые являются не только основным источником эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли, но и долговременным резервуаром, депонирующим значительные количества органического углерода в виде почвенного гумуса. Обсуждены вопросы организации мониторинга парниковых газов на карбоновых полигонах, характере и методах пробоотбора почвенных горизонтов, методологических и методических подходах к определению содержания и запасов органического углерода в почвах. Указано на важность сведений о качественном и количественном составе почвенного органического вещества и гумусовых веществ, которые необходимы для работы современных имитационных моделей и адекватного расчета углеродных единиц для экономической оценки прямого и обратного “углеродного следа”, из-за которого перед Россией стоит ряд проблем, связанных с компенсацией выбросов углерода и “низкоуглеродной” экономикой. Рассмотрены необходимые объемы мониторинговых данных, которые необходимо получать на карбоновых полигонах для использования моделей ROMUL и Efimod. Подчеркнута необходимость адекватного пространственного охвата территории России сетью карбоновых полигонов. Особое внимание следует уделить северным и арктическим территориям распространения многолетнемерзлых пород, содержащих значительные количества органических веществ, которые при потеплении климата могут стать прекурсорами формирования и эмиссии значительных количеств углекислого газа и метана в атмосферу. Ключевые слова: углеродные полигоны, секвестрация углерода, деградация ландшафта, ГИС технологии, изменение климата

Е. В. Шамрикова, Е. В. Ванчикова, Б. М. Кондратёнок, Е. М. Лаптева, С. Н. Кострова Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 787-786. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097>

Основопологающей характеристикой гумусового состояния почв является содержание почвенного органического вещества (ПОВ). В мировой практике для оценки содержания ПОВ активно используется дихроматометрический метод, имеющий значительное разнообразие методик измерения. Унификация способов определения содержания ПОВ, как и других параметров почв, является инструментом международной коммуникации, облегчающим взаимодействие специалистов при создании баз данных по почвам мира, инвентаризации и мониторинге почвенных ресурсов. Приведены сведения о том, что отдельные модификации метода Тюрина могут включать процедуры, снижающие точность измерения содержания ПОВ. Коллективом Института биологии разработана и аттестована новая модификация метода Тюрина, исключая эти процедуры. Опытным путем установлена корректность введения в расчет содержания ПОВ поправочного коэффициента  $f = 1.15$  для учета неполного окисления углерода органических соединений. Использование коэффициента  $f$  при погрешности измерений не более 20% обеспечивает получение результатов, согласованных с методами Уолкли–Блэка и высокотемпературного сжигания органического углерода на анализаторе.

Ключевые слова: метод Тюрина, модификации метода Тюрина, метод Уолкли–Блэка, унификация методов

В. А. Терехова, Е. В. Федосеева, М. И. Панова, С. Н. Чуков Биотестирование гуминовых продуктов как потенциальных ремедиантов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 795-807.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070103>

Наличие экспериментально обоснованной оценки ремедиационных свойств гуминовых продуктов (ГП) – важное условие их безопасного и эффективного использования. Дан анализ существующих подходов к биотестированию ГП, которые позволяют сделать вывод об эффективности детоксикации почв и сопредельных сред и обеспечении жизнеспособности биоценозов при их применении. Обсуждаются преимущества и недостатки традиционных подходов к биотестированию ГП в почвенных средах на основе широко известных реакций высших растений и микроорганизмов, а также возможности альтотестирования с применением флуоресцентных методов и микотестирования ГП в водных и искусственных питательных средах. Результаты экспериментальной проверки ремедирующей способности ГП при биотестировании в средах, богатых органическими веществами, указывают на необходимость стандартизации условий количественной оценки их качества. Универсальной почвенной матрицей для первичной оценки ГП может служить стандартная искусственная почва (по ISO 11268-2). Для обобщающей характеристики качества ГП как потенциальных почвоулучшителей предлагается индекс ремедиации, рассчитываемый по данным химических, биоиндикационных и экотоксикологических исследований почвы, обработанной ГП.

Ключевые слова: гуматы, экология, ремедиация, детоксикация, химическое загрязнение, экологическое качество, индекс ремедиации

Д. Н. Габов, Е. В. Яковлева, Р. С. Василевич, И. В. Груздев Распределение n-алканов в бугристых торфяниках крайнесеверной тайги Европейского северо-востока России и их значение для палеоклиматической реконструкции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 808-824.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070048>

В исследованных торфяниках определены n-алканы C<sub>14</sub>H<sub>30</sub>–C<sub>31</sub>H<sub>64</sub>, содержание которых по всем исследованным профилям почв связано как с разным ботаническим составом растительных остатков торфяников, так и разными климатическими условиями их формирования (температура, влажность). Суммарное содержание n-алканов максимально в период климатического оптимума голоцена и составляет 104–191 мкг/г для исследованных торфяников крайнесеверной тайги. Исследования состава n-алканов (гомологов с нечетным числом атомов углерода C<sub>21</sub>H<sub>44</sub>, C<sub>23</sub>H<sub>48</sub>, C<sub>25</sub>H<sub>52</sub>, C<sub>27</sub>H<sub>56</sub>, C<sub>29</sub>H<sub>60</sub>, C<sub>31</sub>H<sub>64</sub>) и их соотношений позволяют подтвердить особенности изменения растительных сообществ в слоях торфа, климатические условия генезиса торфяных почв. Полученные результаты в комплексе с радиоуглеродным и палеоботаническим анализами могут быть использованы для индикации исходной растительности по периодам торфообразования в голоцене и более точной реконструкции генезиса торфяника.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, палеорастительность, палеоклимат, торф, голоцен, биомаркеры

И.Н. Курганова, В.М. Телеснина, В.О. Лопес де Гереню, В.И. Личко, Л.А. Овсепян Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 825-842.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070073>

Органическое вещество (ОВ) почвы в значительной степени контролирует экосистемные функции почвы и является источником энергии и питательным субстратом для почвенного микробного сообщества. На примере хроноряда агродерново-подзолов (Retic Albic Podzol, южно-таежная зона, Костромская область), выведенных из сельскохозяйственного использования 11, 16 и 40 лет назад, проанализирована постагрогенная динамика содержания органического углерода (Сорг), общего азота (Нобщ) и их отношения С/Н, значений рН, показателей микробиологической и ферментативной активности почв. Для почв хроноряда были также оценены стратификационные отношения (СтО) (0–5 : 5–10; 0–10 : 10–20 и 0–10 : 20–30) для содержания Сорг и Нобщ. Показано, что в ходе постагрогенной сукцессии в слое 0–5 см наблюдается достоверное увеличение содержания Сорг и Нобщ, а также усиление стратификации их распределения в пределах старопахотной толщи, особенно после образования сомкнутого древостоя на бывших пахотных почвах. Постагрогенная сукцессия также способствует росту скорости базального дыхания и содержания микробной биомассы, максимальные значения которых в пределах рассматриваемого хроноряда были характерны для почвы 40-летнего мелколиственного леса. По мере естественного лесовосстановления на бывших пахотных почвах выявлено достоверное усиление фосфатазной активности в пределах всего старопахотного горизонта. Пики активности оксиредуктаз соответствуют стадиям сукцессии с максимальным поступлением легкоразлагаемого растительного опада. За 40 лет постагрогенной сукцессии наблюдается статистически значимое увеличение всех анализируемых показателей (за исключением значений рН) в слое 0–5 см, который более других обогащен органическим веществом.

Ключевые слова: органическое вещество, базальное дыхание, микробная биомасса, фосфатаза, оксидоредуктазы, стратификационное отношение, постагрогенные почвы, естественное лесовосстановление, Retic Albic Podzol

А.Г. Заварзина, В.В. Демин, О.В. Белова, А.А. Леонтьевский, А.В. Лисов Гетерофазный синтез гуминовых веществ иммобилизованной лакказой в проточных условиях при низких концентрациях субстрата // Почвоведение. 2022. № 7. С. 843–859. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070140>

Гуминовыми веществами (ГВ) называют совокупность гетерогенных и полидисперсных соединений, образующихся при трансформации органических остатков в почвах и других природных средах. Роль свободнорадикальных реакций конденсации (вторичного синтеза) в образовании ГВ является предметом дискуссий. Изучена возможность синтеза ГВ из мономеров в динамических условиях и при низких концентрациях веществ в присутствии лакказы гриба *Coprinus comatus* F-2940. Лакказу иммобилизовывали на каолините, модифицированном гидроксидом алюминия. Исследованы некоторые свойства фермента, субстратная специфичность в отношении фенольных кислотпредшественников ГВ, влияние природы аминокислот на способность к образованию комплексов с фенольными кислотами в присутствии лакказы. При иммобилизации лакказы рН оптимум с 2,6-диметоксифенолом (2,6-ДМФ) смещался с рН 6,0 в кислую область (рН 4,4), уменьшалась термостабильность фермента, кинетические параметры окисления 2,6-ДМФ не менялись. По реакционной способности (процент конверсии кислот свободной лакказой) индивидуальные фенольные кислоты образовывали ряд: кофейная (72) > феруловая (53) > галловая = сиреневая (43) > протокатеховая (5,5) > > ванилиновая = п-гидроксибензойная (0). В смеси кислот наиболее эффективно окислялась галловая кислота (50%), остальные кислоты в сопоставимых количествах (13–17%). Конверсия фенольных кислот в их смеси увеличивалась в присутствии лизина. При пропускании смеси галловой, протокатеховой, сиреневой, феруловой кислот (0,01 мМ каждой) и лизина (0,02 мМ) через проточную микроколону иммобилизованная лакказа эффективно окисляла

фенольные кислоты, продукты реакции связывались с минеральной фазой, окрашивая ее в темный цвет. По данным высокоэффективной жидкостной хроматографии молекулярные массы веществ, экстрагированных с поверхности минерала, составляли 270–900 Да, то есть образовывались низкомолекулярные вещества типа фульвокислот. Установлена важная роль свободнорадикальных гетерофазных реакций в формировании молекулярного состава жидкой фазы и органо-минеральных комплексов.

Ключевые слова: органическое вещество почв, гумус, природное органическое вещество, гуминовые кислоты, фульвокислоты, свободнорадикальные реакции, фенолоксидаза

В.М. Семенов, Т.Н. Лебедева, Н.Б. Зинякова, Д.П. Хромычкина, Д.А. Соколов, В.О. Лопес де Гереню, И.К. Кравченко, Х. Ли, М.В. Семенов Зависимость разложения органического вещества почвы и растительных остатков от температуры и влажности в длительных инкубационных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 860-875. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070085>

Температура и влажность являются главными внешними факторами, контролирующими разложение и минерализацию органического вещества в почве. В двух многомесячных опытах исследовали влияние температуры (8 и 22°C) и влажности (15, 30 и 45 мас. %) серой лесной почвы (Luvic Reti Greyzemic Phaeozems (Loamic)) на разложение остатков деревьев (листья, мелкие ветви, тонкие корни) и сельскохозяйственных культур (надземная масса и корни клевера, солома и корни ячменя). Грубоизмельченные (2–10 мм) растительные остатки добавляли в почву в сухом виде в количестве 1% от массы почвы. Разложение органического вещества почвы и растительных остатков оценивали по количеству выделившегося из почвы C–CO<sub>2</sub>.

Эффективность и скорость разложения органического вещества почвы и растительных остатков больше зависели от вида разлагаемого материала, чем от уровней температуры и влажности. Преимущественное разложение легкоразлагаемых компонентов скрадывало температурный отклик устойчивых соединений и низкокачественных растительных остатков. Медленно разлагаемые растительные остатки были более чувствительными к увлажнению почвы. Температурные коэффициенты Q<sub>10</sub> минерализации органического вещества почвы и растительных остатков равнялись в среднем  $1.66 \pm 0.41$  и  $1.39 \pm 0.06$  соответственно, а влажностные коэффициенты W<sub>10</sub> в диапазонах гравиметрической влажности 15–30 и 30–45% составляли для почвы  $1.22 \pm 0.09$  и  $1.21 \pm 0.05$  соответственно, а для растительных остатков –  $1.29 \pm 0.20$  и  $1.25 \pm 0.13$ .

Ключевые слова: органический углерод, минерализация, диоксид углерода, температурный коэффициент Q<sub>10</sub>, влажностный коэффициент W<sub>10</sub>

Р. С. Василевич, О. Л. Кузнецов, Е. Д. Лодыгин, Э. П. Зазовская, А. Н. Панюков Эволюция органического вещества бугристых болот побережья Баренцева моря в условиях меняющегося климата // Почвоведение. 2022. № 7. С. 876-893. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070127>

Выявлено влияние макропараметров (ботанического состава, степени разложения и радиоуглеродного возраста торфа) на молекулярный состав и структуру гуминовых кислот (ГК) бугристых болот побережья Баренцева моря с использованием современных физико-химических методов анализа (13С ЯМР спектроскопии и газовой хроматографии). Предложены прогнозные сценарии эволюции органического вещества бугристых торфяников Арктики и обоснованы показатели их отклика на изменение климата. Мольные отношения x(H) : x(C) показывают степень конденсации молекул ГК в периоды голоцена, а также значительную трансформацию ГК торфяных отложений сезонно-талого слоя в результате современного тренда потепления климата. Степень окисленности отражает динамику гидрологического режима болота. Выявлено, что в результате стабилизации почвенного органического вещества происходит увеличение доли

ароматических и уменьшение содержания парафиновых и карбогидратных фрагментов в ГК. В составе последних происходит перераспределение доли пентоз и гексоз вследствие смены растительных сообществ и сокращение вклада длинноцепочечных алифатических структур парафинов.

Ключевые слова: Арктика, мерзлотные болота, изменение климата, палеорастительность, гуминовые кислоты

С.Н. Горбов, О.С. Безуглова, П.Н. Скрипников, С.А. Тищенко Растворимое органическое вещество в почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. 2022. № 7. С. 894-908.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X2207005X>

Рассмотрены особенности гумусонакопления и миграции по профилю почвенного органического вещества, выделяемого экстракцией холодной и горячей дистиллированной водой. Определение углерода проводили на анализаторе TOC-L CPN Shimadzu. Определение азота вели с помощью анализатора азота (Elementar Analyze GmbH, Ханау, Германия). Почвы – черноземы миграционно-сегрегационные (Calcic Chernozems (Pachic)) под естественной степной растительностью, их аналоги под искусственными древесными насаждениями и урбостратоземы (Urbic Technosols (Molic), Urbic Technosol и Technic Chernozem (Calcic)). На долю растворимых фракций приходится лишь небольшая часть органического вещества почвы, не превышающая 0.14% от всей почвы, что соответствует 4.0% в пересчете на Сорг. Для урбиковых горизонтов антропогенных почв эта величина значительно меньше и составляет 0.04% в почве или около 2.0% от суммы Сорг. В почвах под лесной растительностью миграция органического вещества по почвенному профилю выражена сильнее. Наблюдается небольшое накопление ВОВ на уровне карбонатного барьера. Распределение ВОВ по профилю отличается для антропогенно-преобразованных и естественных почв: в антропогенной толще оно имеет хаотичный характер, а в погребенных слоях чернозема плавно уменьшается с глубиной. Длительная консервация под водонепроницаемыми либо полупроницаемыми покрытиями способствует тому, что в нижней части профиля антропогенных почв на уровне карбонатного барьера накопления ВОВ нет. ВОВ богаты азотом, причем в нижних горизонтах наблюдается явное доминирование этого элемента в органическом веществе горячей экстракции. Низкие коэффициенты экстинкции ВОВ в этих горизонтах говорят о наличии низкомолекулярных веществ фенольной природы.

Ключевые слова: черноземы миграционно-сегрегационные, парково-рекреационная зона, углерод водорастворимых соединений, азот водорастворимых соединений

Б.А. Борисов, О.Е. Ефимов, О.В. Елисеева Органическое вещество и физические свойства постагрогенной эродированной дерново-подзолистой почвы в сравнении с пахотным аналогом // Почвоведение. 2022. № 7. С. 909-917. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070036>

В среднесмытой агродерново-подзолистой реградированной глубокоподзолистой тяжелосуглинистой почве (Albic Retisol (Loamic)) Московской области, находящейся в течение 22 лет в залежном состоянии, произошло достоверное увеличение содержания и запасов общего углерода по сравнению с пахотным аналогом, в основном за счет увеличения содержания углерода легкоразлагаемого органического вещества (легкой фракции). В залежной почве содержание углерода водоэкстрагируемого органического вещества было больше, чем в пахотной. Увеличение содержания этих групп лабильных органических веществ, по-видимому, обусловлено количеством и составом растительных остатков, поступающих в залежную почву, а также замедлением их минерализации по сравнению с пахотной почвой. Установлено существенное увеличение содержания легкой фракции в нижней части поля под пашней относительно верхней части, что связано с переносом легких частиц в результате водной эрозии.

На поле под залежью эти различия минимальны. Наметилась тенденция к уменьшению плотности и плотности твердой фазы в слое 0–10 см залежной почвы по сравнению с пахотной за счет накопления растительных остатков в этом слое. Залежная почва характеризовалась бóльшим содержанием агрономически ценных агрегатов размером 0.25–10 мм, водоустойчивых агрегатов и крупных (>0.05 мм) микроагрегатов.

Ключевые слова: залежная почва, агрегатное состояние почвы, Albic Retisol (Loamic)

В. В. Тихонов, Е. Н. Воронова, М.М. Карпухин, Р.А. Аймалетдинов, В. В. Демин, О. Ю. Дроздова  
Влияние фракций растворенного органического вещества с разной молекулярной массой и Cd<sup>2+</sup> на рост *Scenedesmus obliquus* // Почвоведение. 2022. № 7. С. 918-927. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070115>  
Изучено влияние фракций растворенного органического вещества (РОВ) с разной молекулярной массой и ионов Cd<sup>2+</sup> на скорость роста *Scenedesmus obliquus*. Исследования проводили как отдельно для РОВ и Cd<sup>2+</sup>, так и при их совместном присутствии. Фракции РОВ (>30, 10–30, 3–10, 1–3 и <1 кДа) получали методом ультрафильтрации, рост водорослей фиксировали по содержанию хлорофилла, определяемого спектрофотометрически при 678 нм. Установлено, что Cd<sup>2+</sup> в концентрации 5.62–22.5 мг/л стимулировал, а в концентрации 56.2 и 112.4 мкг/л подавлял рост водорослей. Фракции РОВ оказывали различное воздействие на *S. obliquus*. Они как подавляли, так и стимулировали рост водорослей в диапазоне 0.001–1 мг С/л, и эффект воздействия на скорость роста лежал в диапазоне ±10–25%. Наибольший положительный отклик на рост микроводорослей оказала фракция <1 кДа, что, вероятно, связано с активным участием данной фракции в питании организма. При наличии ингибирующих концентраций Cd<sup>2+</sup> фракции РОВ 30, 1–3 и <1 кДа оказывали положительное влияние на рост *S. obliquus*. Возможными механизмами такого влияния РОВ являлось связывание с ним ионов Cd<sup>2+</sup> (преимущественно на поверхности клеток водорослей), а также высокая биологическая активность его низкомолекулярной фракции <1 кДа. Впервые получены данные по влиянию тяжелых металлов на водоросли в присутствии фракций РОВ с разной молекулярной массой. Они расширяют наше представление о механизмах регулирования численности и состояния микроводорослей в экосистемах при воздействии на нее тяжелых металлов.

Ключевые слова: фракции растворенного органического вещества, молекулярный вес, водоросли, тяжелые металлы

О. С. Якименко, А. Р. Зиганшина, А. А. Степанов, И. Г. Панова, А. А. Ярославов  
Влияние полиэлектролитов на органическое вещество некоторых почв в модельных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 928-939. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070139>  
Изучено воздействие почвенных модификаторов нового поколения на основе полиэлектролитов (ПЭ) на качественный и количественный состав органического вещества двух почв: опесчаненного агрозема (*Dystric Arenosol (Aric)* с низким содержанием гумуса) и среднесуглинистой среднегумусированной серой почвы (*Abruptic Luvisol (Siltic, Cutanic)*). Полимерные рецептуры включали синтетический поликатион, поли(диаллилдиметиламмоний хлорид) (ПДАДМАХ), полианион гуминовой природы, “Лигногумат” (ЛГ), и катионный интерполиэлектролитный комплекс (ИПЭК) на их основе. В лабораторных экспериментах проанализирован состав почвенного органического вещества (ПОВ) после обработки ПЭ по сравнению с вмещающей почвой. На основе методов гельпроникающей хроматографии и обратно-фазовой гидрофобной хроматографии дана оценка влияния ПЭ на молекулярно-массовое распределение и амфифильные свойства ПОВ. Показано, что воздействие ПЭ зависит как от химической природы полимеров, так и от свойств почв. Обработка ЛГ способствует мобилизации подвижных фракций гумуса; ПДАДМАХ закрепляется в составе более прочносвязанных фракций. ИПЭК занимает промежуточную позицию, увеличивая выход

подвижных фракций только в агроземе. Средневесовая молекулярная масса ПОВ незначительно уменьшается с внесением всех полимеров. Воздействие ИПЭК на амфифильность ПОВ зависит от свойств нативного гумуса почв: в серой почве увеличилась доля гидрофильных, а в агроземе – гидрофобных фракций. ПОВ почвы с низким содержанием гумуса и глинистой фракции более подвержено воздействию ПЭ. В более гумусированной, тяжелой почве полимеры эффективней связаны с почвенной органо-минеральной матрицей; их воздействие на ПОВ выражено слабо. Ключевые слова: интерполиэлектролитный комплекс, поли(диаллилдиметиламмоний хлорид), лигногумат, молекулярно-массовое распределение, амфифильность органического вещества почв

В. А. Холодов, Ю. Р. Фарходов, Н. В. Ярославцева, А.Р. Зиганшина Неоднородность органического вещества агрегатов типичных черноземов // Почвоведение. 2022. № 7. С. 940-946.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070061>

С агрегатов 2–1 мм типичных черноземов снимали слои последовательным истиранием в обратном ротаторе в течение 5, 10, 15 и 39 ч. В процессе обработки агрегаты разделились на фракции размерами >1, 1–0.5, 0.5–0.25 и <0.25 мм. В полученных структурных отдельностях определили содержание углерода и азота. Методом аналитического пиролиза с газохроматографическим разделением продуктов и масс-детекцией оценили молекулярное строение органического вещества. В работе использовали образцы многолетних опытов (Курская область): вариант с бесменным черным парованием и вариант 17-летней залежи после черного пара. Показано, что получаемые истиранием частицы <0.25 мм принадлежат к периферийной части агрегатов, они содержат в среднем на 0.5% меньше углерода и 0.05% азота по сравнению с внутренней частью агрегатов – структурными отдельностями >0.5 мм и обрабатываемых на ротаторе не меньше 10 ч. Описанная зависимость наблюдается для агрегатов как пара, так и залежи. Для агрегатов залежи показаны четкие отличия по молекулярному составу органического вещества внешнего слоя от внутренней части агрегатов.

Ключевые слова: препарирование агрегатов, пиролиз газовая хроматография с масс-детекцией (ГХ/МС), многолетние опыты, Protocalcic Chernozems, пиридин, толуол