

- томобильных дорог: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Караганда, 1985.
7. Вернер А.О. Создание и исследование навесного гидроневмоударного оборудования для бестраншейной прокладки дренажа и подземных коммуникаций: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Караганда, 1984.
 8. Вазетдинов А.С. Исследование методов и оборудования подземной проходки при прокладке труб для кабелей связи: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 1959.
 9. Фрейдлих Г. Тиксотропия. М.: ГОНТИ, 1939. 47 с.
 10. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 287 с.
 11. Хархута Н.Я. [и др.] Тиксотропные процессы в грунтах при ударных и вибрационных воздействиях // Труды СоюзДорНИИ. М., 1971. Вып. 48.
 12. Гуменский Б.М. Основы физикохимии глинистых грунтов и их использование в строительстве. Москва, Ленинград: Стройиздат, 1965. 213 с.

13. Лазуткин С.Л. Создание и исследование статико-динамического рабочего органа кротодренажной машины: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Караганда, 1994.

Поступила в редакцию 3 октября 2012 г.

Lazutkin S.L., Lazutkina N.A. A WAY TO RESTORE THE WATER-SALT BALANCE OF SOILS

The description of the method of restoration of water and salt balance of the soil and justification of quantitative evaluation of rational process of computer with an active working body for the formation of horizontal wells in cohesive soils is given.

Key words: without tube drainage; molehill; soil density; thixotropic softening; static and dynamic loading; rate of static effects.

УДК 631.41

РОЛЬ ЛИТОГЕННОЙ ОСНОВЫ В ПОЧВЕННОМ ЦИКЛЕ УГЛЕРОДА: ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© А.Н. Мальцева, Д.Л. Пинский, Б.Н. Золотарева

Ключевые слова: минерализация; динамика гумификации; растительные остатки; минеральный субстрат; гуминовые вещества.

В лабораторных условиях изучена динамика трансформации растительных остатков кукурузы в песке и суглинке. Показано, что при постоянных температуре и влажности динамика гумификации определяется законами волнового развития микробного сообщества. Стабилизация углерода в гумусовом веществе с длительностью эксперимента снижается, а величина отношения $C_{ГК}/C_{ФК}$ увеличивается. Интенсивность и конечные результаты процесса зависят от состава и свойств минерального субстрата.

ВВЕДЕНИЕ

Трансформация *растительных остатков* (РО) в почвах происходит за счет двух противоположно направленных процессов – минерализации и гумификации *органического вещества* (ОВ). Эти процессы являются ключевыми в цикле углерода в наземных экосистемах. Образующиеся *гуминовые вещества* (ГВ), являясь устойчивой формой органических соединений углерода вне живых организмов, обеспечивают выполнение почвами глобальных функций в биосфере. Средняя интенсивность гумусообразования на суше составляет $2,5 \cdot 10^9$ т $C_{орг}$ в год [1]. Существуют различные точки зрения, касающиеся механизмов гумификации, но наиболее распространенными являются конденсационная гипотеза и гипотеза окислительного кислотообразования. Первая предполагает синтез *гуминовых кислот* (ГК) за счет процессов конденсации и полимеризации из мономеров, образующихся в процессе разложения растительных тканей, и продуктов метаболизма микроорганизмов [2–3]. Гипотеза окислительного кислотообразования включает три этапа: 1) новообразование гумусовых кислот за счет ферментативного окисления высокомолекулярных соединений, входящих в состав растительных остатков; 2) трансформация новообразованных гумусовых кислот через стадию приобретения наиболее характерных черт ГК (формирование «зрелых ГК») с одновременным гидролитическим расщеплением и окислением фульвокислот (ФК);

3) очень медленное «неизбежное» разрушение гумусовых кислот вплоть до полной минерализации [4]. Таким образом, гуминовые кислоты являются своеобразным промежуточным этапом трансформации органических остатков в процессе их минерализации. Эти гипотезы получили признание в нашей стране и за рубежом и лежат в основе современных представлений о путях и механизмах превращения неспецифических органических соединений в ГВ. Д.С. Орлов подвел итог этим исследованиям, показав, что оба пути гумификации, вероятно, осуществляются в почвах, а степень их участия в трансформации органического вещества зависит от условий почвообразования [1, 5].

На первом биологическом этапе, достаточно коротком, происходит образование «молодых» неустойчивых ГВ, которые в ходе дальнейшей гумификации стабилизируются, в т. ч. за счет образования связей с минеральной частью [4, 6].

К настоящему времени накоплен обширный материал о возможных типах связи между органическими и минеральными компонентами почвы [4, 7–8]. В последние годы появились теоретические и экспериментальные работы, подтверждающие матричную (каталитическую) функцию глинистых минералов в синтезе ГВ [9–12]. Осуществлен ферментативный синтез гумусоподобных веществ на минеральной матрице из простых продуктов разложения растительных остатков [13]. *Целью* данной работы является изучение влияния моно- и полиминерального субстратов на минерализа-

цию и гумификацию растительных остатков в лабораторных условиях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения модельных экспериментов использовалась кукуруза, надземную массу которой предварительно высушивали и измельчали до размеров 3–5 мм. В первой серии экспериментов в качестве минеральных сред использовали чистый кварцевый песок и бескарбонатный покровный суглинок (Московская обл.). Песок предварительно отмывали 10 %-ным раствором HCl до отрицательной реакции на Fe^{3+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , а затем от следов Cl⁻ дистиллированной водой. Минералогический состав суглинка представлен кварцем – 59 %, каолинитом – 16 %, слюдой – 13 %, полевыми шпатами – 11 % и смектитом – 2 %. Песок и суглинок тщательно перемешивали с измельченной надземной массой кукурузы в соотношении 1 : 10, помещали в стеклянные сосуды объемом 200 см³, увлажняли до 60 % от полной влагоемкости подготовленного материала. Инокуляцию субстрата почвенными микроорганизмами производили путем внесения в каждый сосуд 1 мл почвенной суспензии, содержащей 0,01 г серой лесной почвы. Инкубация осуществлялась в биологическом термостате при температуре 20 °С. Продолжительность эксперимента составила 19 месяцев. Образцы для исследования отбирали через 0,5, 1, 3, 6, 9,5 и 19 месяцев эксперимента. Повторность опыта трехкратная. Гуминовые вещества экстрагировали обработкой инкубированного материала раствором 0,1 M

$Na_4P_2O_7$ с pH около 10 [4]. Углерод в общем экстракте, растворах ГК и ФК определяли по Тюрину.

Потери в результате минерализации оценивали по разности между содержанием углерода в субстратах в начальный момент (C_0) и пробах каждого срока инкубации ($C_{i,j}$). Препараты ГК выделяли двукратной экстракцией 0,1 n NaOH с последующим осаждением ГК 6 M HCl. Очистку осуществляли переосаждением после повторного растворения препаратов в щелочи с добавлением KCl и обработкой раствора смесью 0,1 M HCl и 0,3 M HF [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Закономерности минерализации РО кукурузы в песчаном и суглинистом субстратах. Изменение содержания углерода в изучаемых системах в долях углерода от исходного содержания представлено на рис. 1. В первый месяц инкубации в песчаном субстрате минерализовалось около 50 %, в суглинистом – около 24 % от C_0 . После стадии энергичной минерализации процесс замедлился и после 6 месяцев эксперимента в песчаном субстрате суммарные потери C-CO₂ не превысили 55 % C_0 . За этот же период инкубации РО кукурузы в суглинистом субстрате потери углерода достигли уровня сопоставимого с его потерями в песчаном субстрате.

Таким образом, процессы минерализации в суглинистом субстрате протекают с некоторой задержкой по сравнению с песчаным, но постепенно достигают такой же глубины.

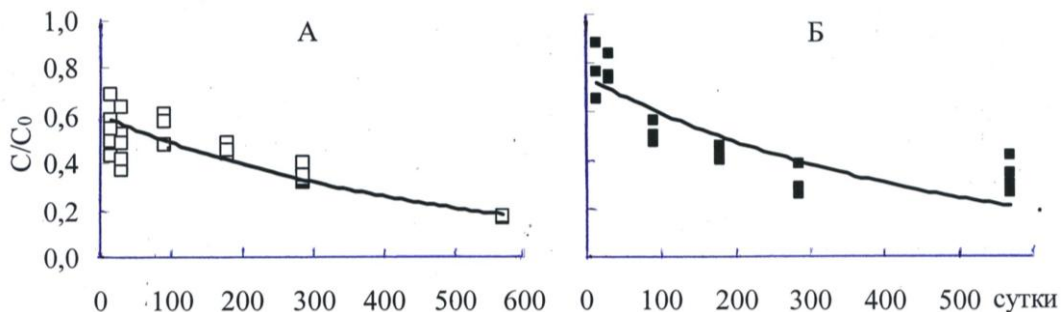


Рис. 1. Изменение содержания $C_{орг}$ песчаного (А) и суглинистого (Б) субстратов в процессе трансформации растительных остатков кукурузы

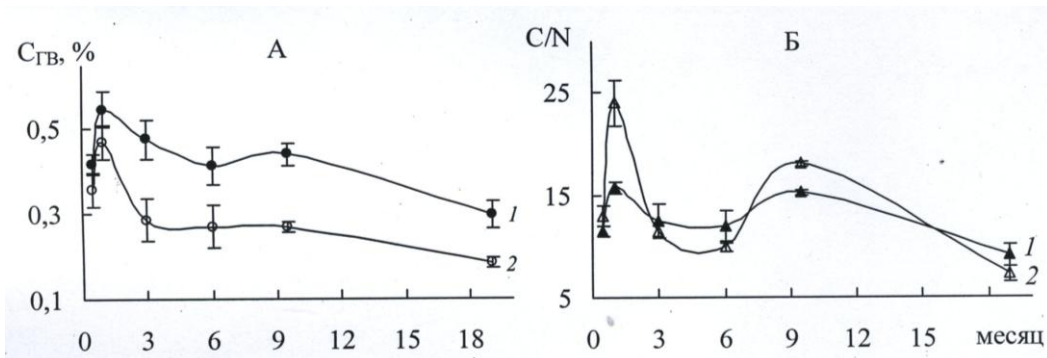


Рис. 2. Изменение содержания ГВ (А) и отношение C/N (Б) в них в процессе гумификации растительных остатков кукурузы. Условные обозначения: 1 – в суглинке; 2 – в песке

Таблица 1

Динамика содержания новообразованных гуминовых веществ, % от C_0 , и глубина гумификации, $C_{ГК}/C_{ФК}$, растительных остатков кукурузы в лабораторном эксперименте

Показатели	Срок инкубации, месяц					
	0,5	1	3	6	9,5	19
Песок						
$C_{ГК}$	4,1	6,0	2,9	3,5	3,7	2,7
$C_{ФК}$	3,3	3,7	3,1	2,3	1,9	1,0
$C_{ГК}/C_{ФК}$	1,2	1,6	0,9	1,5	1,9	2,7
Суглинок						
$C_{ГК}$	4,2	5,7	4,3	4,3	5,1	3,4
$C_{ФК}$	3,6	4,7	4,7	3,4	3,2	2,1
$C_{ГК}/C_{ФК}$	1,2	1,2	0,9	1,3	1,6	1,6

После 6 месяцев инкубации наступила фаза медленной минерализации, когда трансформации подвергался уже не только исходный материал, но и комплекс исходного и частично трансформированного материала с гумусовыми веществами и продуктами разложения и метаболизма микроорганизмов.

В последующий период инкубации от 6 до 9 месяцев потери углерода в обеих системах увеличились всего на 10–12 %, продолжая оставаться сопоставимыми – 65–70 % от C_0 . Далее, в суглинистых системах процесс минерализации РО стабилизировался на низкой интенсивности и к концу опыта (19 месяцев) в системе осталось 33 ± 7 % от C_0 . В песчаных субстратах разложение РО, как и следовало ожидать, продолжалось с несколько большей интенсивностью, и к 19 месяцам инкубации в системе осталось только $17 \pm 0,4$ % углерода от исходного содержания. В его состав, очевидно, входит углерод трудногидролизуемого лигнина (11 % от массы исходного растительного материала) и новообразованные ГВ, устойчивые к биоминерализации, содержание которых к этому моменту времени достигло 3,7 % от C_0 (табл. 1).

Фазу медленной минерализации связывают с ингибирующим действием лигнина и стабилизацией продуктов разложения РО и новообразованных ГВ за счет адсорбции на поверхности глинистых минералов [5, 15]. Фазу быстрой минерализации связывают с разложением лабильного пула углерода, сопоставимого отчасти с легкой фракцией органического вещества (плотность $< 1,8$ г/см³). В ней доминируют органические остатки разной биохимической природы и различной степени минерализации и, кроме того, гумусовые соединения, представленные металлогуминовыми комплексами, а также углистые вещества [16]. Наибольшие различия систем проявляются при разложении именно лабильного пула углерода. Его константа разложения (k_1) в песчаной среде составляет $0,069$ сут.⁻¹, в суглинке – $0,032$ сут.⁻¹. Константы разложения трудно минерализуемого пула углерода (k_2) близки – $0,0015$ и $0,0012$ сут.⁻¹ соответственно.

Гумификация РО кукурузы в песчаном и суглинистом субстратах. Количество ГВ, образующихся при разложении РО кукурузы, в песке и суглинке существенно различалось (табл. 1), динамика гумификации оставалась подобной (рис. 2А).

Максимальное и приблизительно одинаковое количество вновь образованных ГВ отмечено в исследуемых системах через месяц инкубации. Доля ГВ на этот момент достигала около 10 % от C_0 . Согласно М.М. Кононовой именно за это время заканчивался период гумификации РО наземной массы подавляющего количества видов растений [2]. Через 3 месяца инкубации содержание ГВ в песчаных субстратах резко уменьшилось до 6,0 % от внесенного C_0 . Вероятно, это связано не только со снижением интенсивности гумификации, но и минерализацией новообразованных ГВ. В период от 3 до 9,5 месяцев процесс гумификации протекал практически в стационарном режиме с постепенным уменьшением содержания ГВ до 5,6 %. К концу 19 месяцев эксперимента величина $C_{ГВ}$ в песке составила 3,7 %.

В опытах с суглинком уменьшение интенсивности гумификации после 1 месяца инкубации происходило медленнее. К 6 месяцам эксперимента содержание $C_{ГВ}$ оказалось больше на 1,9 %, чем в песчаном субстрате. Через 9,5 месяцев с начала эксперимента наблюдается вторичное увеличение содержания ГВ до 8,3 % от C_0 . После чего, вплоть до 19 месяцев инкубации, наблюдалось постепенное уменьшение содержания гуминовых веществ. Таким образом, выявлена колебательная динамика содержания ГВ в суглинистом субстрате. Более ярко волновой характер процесса гумификации подчеркивает динамика величины отношения C/N в гуминовых веществах (рис. 2Б).

Известно, что на разных этапах трансформации ОВ происходит смена популяций микроорганизмов, обусловленная изменением состава питательных субстратов в ходе трансформации РО, и формирование в системе универсальных сукцессионных комплексов микроорганизмов-деструкторов. Характер гумификации определяется, вероятно, законом «волнообразного развития микробной популяции» [15].

В условиях описываемого модельного эксперимента коэффициент гумификации РО кукурузы достиг 3,6 % $C_{ГВ}$ в год в суглинке и 2,5 % – в песке. Более высокая аккумуляция ГВ в суглинке по сравнению с песком объясняется: 1) адсорбцией ГВ поверхностью дисперсных минеральных частиц с образованием прочных адсорбционных комплексов, труднодоступных для дальнейшей минерализации; 2) наличием в субстрате минералов с высоким содержанием гидроксидов Al и Fe, обуславливающих положительный заряд значительной части высокодисперсных минеральных частиц и, следовательно, более прочную адсорбцию карбоксилсодержащих органических молекул [17] и 3) затрудненной аэрацией более тонкодисперсного субстрата, обусловленной его сложением. Песок обладает противоположными свойствами, в результате чего создаются более благоприятные условия для биоминерализации РО и новообразованных ГВ.

Влияние минерального субстрата на процесс гумификации также отчетливо проявляется в количестве образующихся гуминовых кислот и глубине гумификации органического материала (табл. 1). Динамика содержания ГК в инкубируемых системах повторяет динамику содержания ГВ – имеет волнообразный характер с трендом постепенного уменьшения количества в ходе эксперимента. Больше количество ГК образуется в суглинистой системе. Одновременно, гранулометрическая, минералогическая и химическая гетерогенность

суглинка препятствуют минерализации углерода в целом и, в т. ч., минерализации новообразованных ФК. Очевидно, это связано с тем, что ФК – наиболее активная часть гуминовых веществ с более высоким содержанием кислородсодержащих функциональных групп. Это обеспечивает им более прочную адсорбцию на суглинке и, следовательно, меньшую доступность микроорганизмам. В результате содержание ФК в суглинистом субстрате выше, а отношение $C_{ГК}/C_{ФК}$ ниже, чем в песчаном, практически на протяжении всего эксперимента.

В обеих исследуемых системах глубина гумификации, характеризуемая величиной отношения $C_{ГК}/C_{ФК}$, постоянно увеличивается, достигая максимальных значений в конце эксперимента. Это абсолютно совпадает с основным правилом «кинетической теории гумификации» Д.С. Орлова – отбором термодинамически и биохимически устойчивых гуминовых веществ.

Таким образом, исследования показали, что динамика процессов трансформации РО в разных минеральных средах во многом сходна и определяется характером развития микробного сообщества. Интенсивность и качественные характеристики процессов минерализации и гумификации при постоянных температуре и влажности инкубирования зависят от состава и свойств минеральной матрицы и поэтому различаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс гумификации РО носит волновой характер и более отчетливо выражен в суглинистом субстрате. Это связано, вероятно, с изменением общей численности и активности микроорганизмов, структуры микробных ценозов в ходе эксперимента из-за меняющегося качества органического материала в системах, т. е. определяется законом «волнообразного развития микробной популяции».

Количество новообразованных гуминовых веществ за год при трансформации растительных остатков в системах, содержащих глинистые минералы, в 1,44 раза больше, чем в песке. Это связано с их стабилизацией при образовании прочных минералоорганических соединений с высокодисперсными компонентами. Эти соединения труднодоступны микроорганизмам и обеспечивают сохранность не только гуминовых, но и значительной части фульвокислот. Глинистые субстраты, обеспечивая лучшую защищенность ГВ в целом от минерализации, поддерживают в составе ГВ заметную долю ФК. При этом величина отношения $C_{ГК}/C_{ФК}$ сужается по сравнению с песчаными системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуминовые вещества в биосфере / под ред. Д.С. Орлова. М.: Наука, 1993. 237 с.
2. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
3. Flaig W. Organic compounds in Soil // Soil Sci. 1971. V. 111. № 1. P. 19-33.
4. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
5. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
6. Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // Org. Geochem. 2000. V. 31. № 7-8. P. 697-710.
7. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces // Biogeochemistry. 2007. V. 85. № 1. P. 9-24.
8. Schnitzer M. Reactions of minerals with soil humic substances // Minerals in soil Environments / ed. by J.B. Dixon, S.B. Weed. Madison: WI. Soil Science Society of America, 1977. P. 741-770.
9. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 295 с.
10. Пинский Д.Л., Курочкина Г.Н. Эволюция учений о поглотительной способности почв // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 295-312.
11. Birkel U., Gerold G., Niemeyer J. Abiotic reactions of organics on clay mineral surfaces // Developments in Soil Science. 2002. V. 28. Part 1. P. 437-447.
12. Kaiser K., Guggenberger G. Mineral surfaces and soil organic matter // Europ. J. Soil Sci. 2003. V. 54. Issue 2. P. 219-236.
13. Zavarzina A.G. A mineral support and biotic catalyst are essential in the formation of highly polymeric soil humic substances // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 39. № 1. P. S48-S53.
14. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
15. Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика здоровья и качества почвы // Агрохимия. 2011. № 12. С. 4-20.
16. Травникова Л.С., Титова Н.А., Шаймухаметов М.Ш. Роль продуктов взаимодействия органической и минеральной составляющих в генезисе и плодородии почв // Почвоведение. 1992. № 10. С. 81-97.
17. Курочкина Г.Н., Пинский Д.Л. Образование минералоорганических соединений и их влияние на поверхностные свойства почвенных алюмосиликатов // Почвоведение. 2004. № 4. С. 441-451.

Поступила в редакцию 3 сентября 2012 г.

Maltseva A.N., Pinskiy D.L., Zolotareva B.N. ROLE OF LI- THOGENIC BASIS IN SOIL CARBON CYCLING: LABORATORY MODELING

The dynamics of maize plant residues transformation in sand and loam substrates was studied in laboratory conditions. It was shown that dynamics of the plant residues humification determine by the laws of wave development of the microbial community at constant temperature and humidity. The stabilization of the humic substances carbon in duration of this experiment was reduced, but the ratio of the HA/FA was increased. The intensity of the process and the final results depend on the composition and properties of the mineral substrate.

Key words: mineralization; dynamics of humification; plant residues; mineral substrate; humic substances.