

УДК 631.4

ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ВНЕСЕНИИ ГЛЮКОЗЫ И КАДМИЯ

С.Ю. Селивановская¹, А.Р. Гильмуллина¹, Я.В. Кузяков², П.Ю. Галицкая¹

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

²*Гёттингенский университет имени Георга-Августа, г. Гёттинген, 37073, Германия*

Аннотация

Закрепление углерода в почве, его трансформация и минерализация являются важными этапами круговорота углерода, регулирующими почвенное плодородие. Внесение органических удобрений и токсичных веществ, например тяжелых металлов, приводит к изменению естественного потока углерода. В работе проанализировано изменение содержания органического и растворимого органического углерода, микробной биомассы и оценена дыхательная активность почвы, отобранной с различной глубины, под воздействием глюкозы и кадмия. Внесение органического вещества в виде растворимых соединений (глюкозы) приводит к резкому увеличению метаболической активности, но не приводит к значительному закреплению углерода в почве в виде микробной биомассы или нерастворимых соединений. Тяжелые металлы в почве снижают скорость потока углерода через пул растворимого углерода, не увеличивая при этом углерод микробной биомассы. Наблюдаемый эффект кадмия наиболее выражен в почве глубже 20 см с низким содержанием органического вещества.

Ключевые слова: поток углерода, экология почвенных микроорганизмов, кадмий, глюкоза, тяжелые металлы

Введение

Одной из актуальных проблем современного земледелия является резкое снижение содержания органического вещества почвы, что связано с интенсивным способом ее обработки и эрозией. Решением этой проблемы является разработка новых методов обработки, обеспечивающих секвестрацию углерода. Такие решения необходимы, с одной стороны, для обеспечения продукции для растущего населения планеты, с другой – для снижения скорости изменения климата за счет частичного связывания антропогенной эмиссии CO₂ посредством секвестрации С в почве [1].

Органический углерод почвы представлен разными пулами: закреплён в неразложившихся растительных и животных остатках, гумусе, микробной биомассе, присутствует в растворимой форме. Трансформация органического вещества в почве является важной частью цикла углерода, обеспечивающего почвенное плодородие. Именно органические соединения являются хранилищем энергии в наземных биомах [2, 3].

Одним из способов повышения почвенного плодородия является внесение дополнительного углерода в составе органических удобрений. Такая обработка почвы приводит к изменению традиционного потока углерода, что обуславливает зачастую негативные эффекты [4–6]. Это связано с тем, что в составе традиционных органических удобрений углерод содержится в доступной форме. Выступая за счет этого стимулятором микробной активности почвы, он может приводить к увеличению скорости разложения почвенного органического углерода [7, 8]. Кроме того, быстрая минерализация внесенных органических веществ микроорганизмами приводит к интенсивному выделению CO_2 .

Изменение распределения углерода в почве зависит от стабильности вносимого органического вещества. Так, в случае внесения жидких отходов животноводства или птицеводства органический углерод может полностью разложиться и минерализоваться микроорганизмами [9–11], тогда как при внесении устойчивого органического вещества, такого, например, как биочар, углерод может сохраняться в почве столетиями [11–14].

Анализ изменения потоков углерода в почвенных системах чаще всего проводится с использованием легко минерализуемых соединений, в частности, глюкозы, которые в природных условиях могут поступать в почву с сырыми, необработанными органическими удобрениями или в составе корневых выделений [11, 15]. Так, показано, что внесение глюкозы как в низких (37–47 мкг С/г), так и в высоких (0.8–4.87 мг С/г) концентрациях приводит к увеличению выделения CO_2 . Этот эффект связан либо с разложением внесенных соединений, либо с окислением почвенного органического вещества [7, 16–18].

Существенную роль в распределении вносимого углерода играет тип почвы и содержание в ней органического вещества, поскольку именно почвенное органическое вещество определяет состав и структуру микробных сообществ [4, 7, 19]. В частности, И.Х. Янардаг с соавторами (2017) высказали гипотезу, что внесение лабильных органических соединений в почву с низким содержанием органического вещества способствует более выраженному изменению микробной активности по сравнению с почвами с высоким содержанием углерода.

Помимо органического вещества на микробную активность почвы могут влиять и тяжелые металлы, источником которых являются минеральные и органические нетрадиционные удобрения, а также выбросы промышленных предприятий. Эффект металлов на почвенные процессы хорошо известен [20–27]. В то же время их одновременное поступление с органическим веществом может вызвать эффект, не являющийся результатом простого их суммирования. Поэтому целью настоящего исследования явилась оценка изменения потоков углерода в почвах, различающихся содержанием органического вещества при внесении глюкозы и кадмия.

Методы и материалы

Для проведения эксперимента использовали почвенные образцы одного генезиса, но различающиеся по содержанию органического вещества. Такие образцы были получены при отборе проб в одном почвенном разрезе с разных глубин (0–20, 20–40 и 40–60 см) – s0-20, s20-40, s40-60. Сразу после отбора почв образцы делили на четыре части, одна из которых служила контрольным вариантом, в три другие вносили глюкозу в количестве 3 мг С/г почвы (образцы

Glu0-20, Glu20-40, Glu40-60), кадмий – 0.3 мг/г почвы (образцы Cd0-20, Cd20-40, Cd40-60) и одновременно глюкозу и кадмий (CdGlu0-20, CdGlu20-40, CdGlu40-60). Образцы инкубировали в течение 15 сут при комнатной температуре и влажности 70% от общей влагоемкости почвы. В исходной почве, в образцах через 1 и 15 сут от начала эксперимента определяли содержание органического углерода ($C_{орг}$) согласно ISO 14235:1998 [28], микробную биомассу согласно ISO 14240-2:1997 [29] и растворимый органический углерод (РОУ) [28]. В течение всего эксперимента определяли выделение CO_2 и рассчитывали кумулятивное дыхание за 15 дней [30]. Все варианты были заложены в трех повторностях. Для расчетов статистической значимости различий использовали статистическую систему R [31].

Результаты

При анализе потоков исходили из того, что углерод внесенного органического вещества распределяется в почве по следующим пулам: неразложившиеся растительные остатки и гумус (РОиГ), растворимый органический углерод (РОУ), углерод микробной биомассы ($C_{мик}$). Часть органического вещества минерализуется и углерод выводится из почвы в виде CO_2 . Исходя из этого в почвенных образцах, определяли кумулятивную дыхательную активность, растворимый углерод и углерод микробной биомассы, а также органический углерод ($C_{орг}$). Данные об исходных характеристиках почвенных образцов представлены в табл. 1.

Табл. 1

Характеристики почвенных образцов

Образец	Органический углерод, мг С/г	Углерод микробной биомассы, мг С/г	Растворимый органический углерод, мг С/г
s0-20	39.3	0.44	0.06
s20-40	4.9	0.14	0.04
s40-60	1.6	0.06	0.03

Максимальное содержание органического углерода обнаружено в образце почвы, отобранной в верхнем горизонте. В образцах, отобранных на глубине 20-40 и 40-60 см (s20-40 и s40-60), его содержание оказалось ниже в 8 и 24.5 раза соответственно. Аналогичная тенденция была отмечена при распределении значения $C_{мик}$ и РОУ. Однако различия в значениях оказались существенно меньшими. Так, кратность превышения уровня микробной биомассы в образце s0-20 над остальными составила 3.1 и 7.3 для $C_{мик}$ и 1.5 и 2 для РОУ соответственно. Полученные результаты согласуются с основными представлениями о том, что содержание $C_{орг}$ определяет количество микроорганизмов в почве [4, 7]. Анализ респираторной активности почв выявил, что за 15 сут из образца s0-20 происходит выделение 0.7 мг С/г почвы (рис. 1). Это выделение является результатом метаболической активности микроорганизмов, разлагающих почвенное органическое вещество. Дыхание микроорганизмов в почвенных образцах s20-40 и s40-60 оказалось в 1.5 и 2.2 раза ниже по сравнению с вариантом s0-20, что связано с меньшим количеством почвенного органического вещества и микробной биомассы в этих образцах. Через 15 сут во всех контрольных образцах не произошло достоверных изменений содержания $C_{орг}$, $C_{мик}$, РОУ (рис. 2-4).

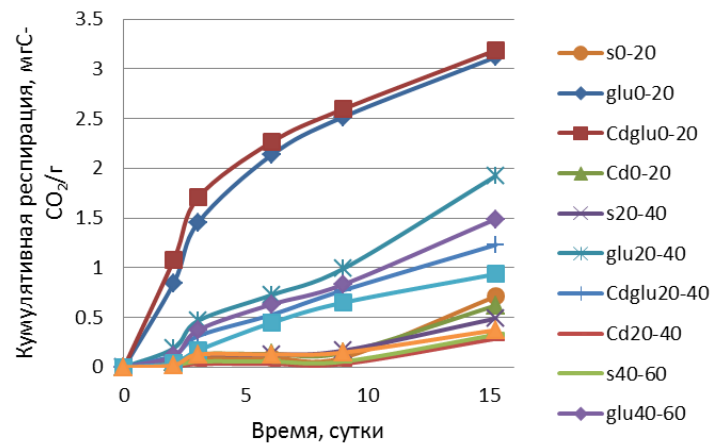


Рис. 1. Кумулятивное выделение CO₂ из почвы и эффект добавления глюкозы и кадмия

Через сутки после внесения кадмия такие почвенные характеристики, как $C_{\text{орг}}$ и РОУ, не отличались от значений в почве без внесения. После внесения кадмия микробная биомасса в почве варианта Cd0-20 сохранилась на уровне контроля (0.51 мг С/г), а в вариантах Cd20-40 и Cd40-60 ее уровень составил менее 0.01 мг С/г. Это говорит о том, что кадмий угнетает микробные сообщества почв с низким содержанием органического вещества. Через 15 сут во всех образцах с внесенным кадмием содержание $C_{\text{орг}}$ и РОУ оказалось на прежнем уровне. Незначительное увеличение отмечено для микробной биомассы, что может свидетельствовать о начале адаптации микроорганизмов к его негативному воздействию. При анализе дыхательной активности почв, содержащих кадмий, выявлено, что кумулятивное дыхание всех образцов с внесенным кадмием оказалось сопоставимым с контрольным вариантом и составило 0.62, 0.28 и 0.37 мг CO₂-С/г для образцов Cd0-20, Cd20-40 и Cd40-60 соответственно. Принимая во внимание низкий уровень микробной биомассы в образцах Cd20-40 и Cd40-60, можно было бы предположить и более низкий уровень респираторной активности. Однако существенная часть энергии, получаемой в процессе дыхания, затрачивается на адаптацию к токсичному воздействию кадмия. Такое явление известно: при высоком содержании тяжелых металлов может наблюдаться снижение биомассы и увеличение дыхания [32, 33]. Соотношение дыхания к биомассе является чувствительным индикатором статуса микробного сообщества [33, 34].

Внесение в почву глюкозы в количестве 3 мг/г ожидаемо привело к резкому увеличению содержания РОУ во всех образцах (рис. 4). Так, через сутки после внесения значения РОУ в образцах glu0-20, glu20-40 и glu40-60 составили 1.6, 2.6 и 2.5 мг С/г соответственно. Минимальное значение РОУ выявлено в образце с максимальным содержанием $C_{\text{орг}}$. Принимая во внимание исходное содержание РОУ и количество внесенной глюкозы, обнаруженное количество составляет около 50% от ожидаемого содержания. Необходимо отметить, что в образце, отобранном в верхнем горизонте (0–20 см), выявлена максимальная биомасса. Поэтому низкое содержание РОУ, скорее всего, связано с активной минерализацией внесенного органического вещества непосредственно после

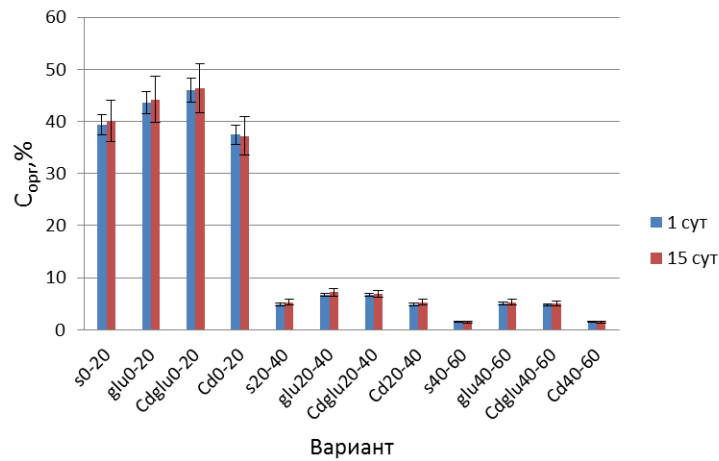


Рис. 2. Изменение органического углерода при инкубировании почвы с внесенными глюкозой и кадмием и без них

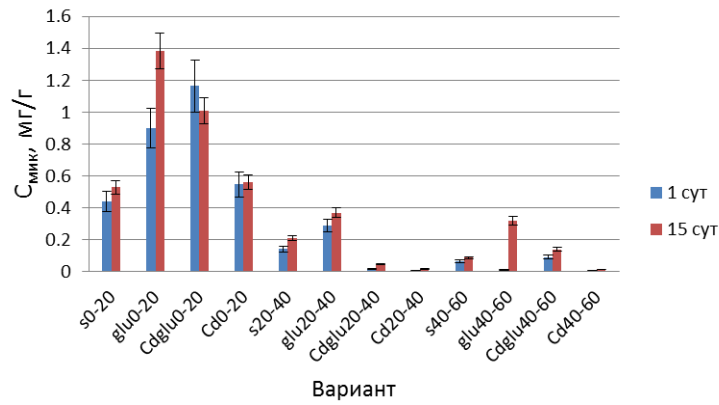


Рис. 3. Изменение микробной биомассы при инкубировании почвенных образцов после добавления глюкозы и кадмия и без них

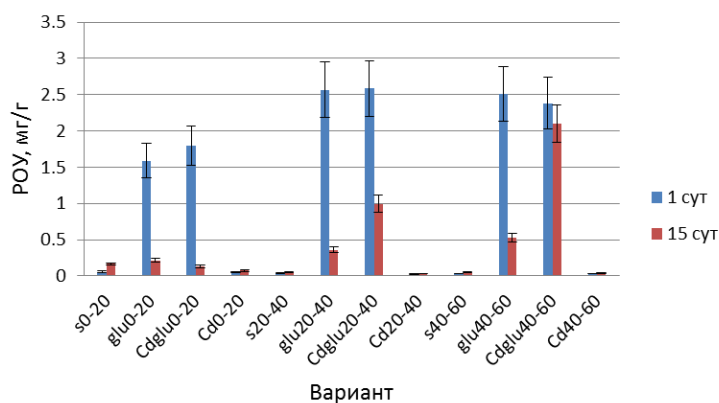


Рис. 4. Изменение растворимого органического вещества при инкубировании почвенных образцов после добавления глюкозы и кадмия и без них

его внесения. Подтверждением этому является, во-первых, высокий уровень респираторной активности у образца glu0-20 (3.1 мг CO₂-С/г, за 30 сут – 4.4 мг CO₂-С/г почвы), во-вторых, тот факт, что максимальная скорость окисления глюкозы наблюдалась в течение первых трех суток (рис. 1). Действительно, через 15 сут содержание РОУ в образце glu0-20 снижается до уровня в почве без внесения глюкозы. На внесение глюкозы микробное сообщество анализируемого образца отвечает не только повышением метаболической активности, но и увеличением уровня микробной биомассы до 1.4 мг С/г (рис. 3). В отличие от почвы с внесением кадмия, одновременное увеличение респирации и биомассы свидетельствует о благоприятном воздействии глюкозы на сообщество.

Высокое содержание РОУ через сутки в образцах glu20-40 и glu40-60 связано с тем, что крайне низкое количество микроорганизмов не позволяет резко увеличить их активность. Однако через 15 сут количество РОУ в этих образцах также снижается в 7.1 и 4.7 раз, но его уровень остается выше контрольной почвы. Респираторная активность микробных сообществ образцов glu20-40 и glu40-60, несмотря на одинаковое количество внесенной глюкозы, оказалась существенно ниже по сравнению с вариантом glu0-20 и зависела от исходного содержания в образцах С_{орг} и С_{мик}. Обнаружено незначительное увеличение С_{орг} во всех образцах сразу после внесения глюкозы, уровень которого не снижался в течение 15 сут.

При одновременном внесении кадмия и глюкозы, так же как и в предыдущем варианте, наблюдали увеличение РОУ. Закономерность его увеличения, связанная с метаболической активностью микроорганизмов, была также аналогичной. Через сутки в образце Cdglu0-20 содержание РОУ оказалось ниже, чем в образцах Cdglu20-40 и Cdglu40-60. При этом через 15 сут от начала эксперимента содержание РОУ в образце Cdglu0-20 снизилось в 13.7 раз, тогда как для Cdglu20-40 снизилось только в 2.6 раз, а в образце Cdglu40-60 осталось практически на том же уровне. Это свидетельствует о том, что кадмий оказал ингибирующее влияние на микрофлору почв только с низким содержанием органического вещества.

Влияние кадмия подтверждается и анализом кумулятивной респираторной активности – в образце Cdglu0-20 ее уровень сопоставим с уровнем варианта glu0-20, тогда как для вариантов Cdglu20-40 и Cdglu40-60 он оказался ниже в 1.6 раз по сравнению с таковыми в вариантах с внесением только глюкозы.

На внесение глюкозы вместе с кадмием микробное сообщество отреагировало и изменением уровня микробной биомассы. В образце с высоким содержанием углерода произошло увеличение микробной биомассы, значение которой достоверно не изменилось и через 15 сут эксперимента. В то же время в образцах Cdglu20-40 и Cdglu40-60 через сутки от начала эксперимента существенного увеличения биомассы по сравнению с контролем не обнаружено. Установлено незначительное увеличение С_{орг} во всех вариантах, сопоставимое с таковым при внесении только глюкозы. При этом в варианте Cdglu40-60 это увеличение оказалось наиболее выраженным: содержание С_{орг} увеличилось по сравнению с контролем в 3.5 раза.

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет заключить, что глюкоза оказывает стимулирующее влияние на микробные почвенные сообщества, увеличивая микробную биомассу и респираторную активность, причем чем выше исходное содержание органического углерода в почве, тем более выражен стимулирующий эффект. Кадмий оказывает негативный эффект на сообщество, снижая микробную биомассу, но данный эффект наблюдается только в случае почвенных образцов с низким содержанием органического вещества. При этом микробное сообщество сохраняет респираторную активность на уровне контроля, что подтверждает негативный эффект кадмия. Ответная реакция микробного сообщества на одновременное внесение глюкозы и кадмия похожа на таковую после внесения кадмия.

В заключение отметим, что потоки углерода, оцененные в течение 15 сут, при внесении глюкозы или при одновременном внесении глюкозы и кадмия различаются. Кроме того, существенные отличия в потоках углерода наблюдаются и в зависимости от исходной характеристики почвы, в частности, от содержания органического вещества. В почвах с высоким содержанием органического вещества углерод, вносимый с глюкозой, проходя транзитом через пул растворимого органического вещества, частично (около 25%) закрепляется в микробной биомассе, при этом большей частью быстро минерализуется. В почвах с более низким содержанием углерода, вследствие более низкого уровня и активности микроорганизмов исходной почвы, внесенный углерод частично остается в виде РОУ (около 10–15 %), закрепляется в биомассе (около 5–8%), остальной углерод минерализуется. Одновременное внесение кадмия с глюкозой в почву с высоким содержанием углерода незначительно снизило выделение углекислого газа в процессе минерализации, однако в составе микробной биомассы закрепление углерода оказалось ниже по сравнению с почвой, куда вносили только глюкозу. Так же как и в предыдущем случае, углерод не накапливался в виде растворимого вещества. Внесение кадмия и глюкозы в почвы с низким исходным содержанием углерода привело к существенному снижению потока углерода. Так, минерализации подверглось лишь 25% и 20% от вносимого углерода. Существенно большее количество углерода по сравнению с почвами, в которые внесена только глюкоза, закрепляется в пуле РОУ – 32% и 68%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что внесение органического вещества в виде растворимых соединений приводит к резкому увеличению метаболической активности и не приводит к значительному закреплению углерода в микробной биомассе или в нерастворимой форме, что диктует необходимость разработки органических удобрений с медленно выделяющимися питательными веществами. Поступление тяжелых металлов в почву на фоне глюкозы снижает скорость потока углерода через пул растворимого углерода, не увеличивая при этом существенно углерод микробной биомассы. Наблюдаемый эффект наиболее выражен в почвах с низким содержанием органического вещества.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-04-04520) и Программы Правительства Российской Федерации повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета.

Литература

1. *Moinet G.Y.K., Cieraad E., Turnbull M.H., Whitehead D.* Effects of irrigation and addition of nitrogen fertiliser on net ecosystem carbon balance for a grassland // *Sci. Total Environ.* – 2017. – V. 579. – P. 1715–1725. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.199.
2. *Song Y., Zou Y., Wang G., Yu X.* Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis // *Soil Biol. Biochem.* – 2017. – V. 109. – P. 35–49. – doi: 10.1016/j.soilbio.2017.01.020.
3. *Liao C., Peng R., Luo Y., Zhou X., Wu X., Fang C., Chen J., Li B.* Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: A meta-analysis // *New Phytol.* – 2008. – V. 177. – P. 706–714. – doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02290.x.
4. *Blagodatskaya E.V., Blagodatsky S.A., Anderson T.-H., Kuzyakov Y.* Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies // *Appl. Soil Ecol.* – 2007. – V. 37, No 1–2. – P. 95–105. – doi: 10.1016/j.apsoil.2007.05.002.
5. *Schlesinger W.H., Andrews J.A.* Soil respiration and the global carbon cycle // *Biogeochemistry.* – 2000. – V. 48, No 1. – P. 7–20. – doi: 10.1023/A:1006247623877.
6. *Abaye D.A., Brookes P.C.* Relative importance of substrate type and previous soil management in synthesis of microbial biomass and substrate mineralization // *Eur. J. Soil Sci.* – 2006. – V. 57, No 2. – P. 179–189. – doi: 10.1111/j.1365-2389.2005.00727.x.
7. *Wang J., Xiong Z., Yan X., Kuzyakov Y.* Carbon budget by priming in a biochar-amended soil // *Eur. J. Soil Biol.* – 2016. – V. 76. – P. 26–34. – doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.07.003.
8. *Li Q., Tianc Y., Zhanga X., Xua X., Wanga H., Kuzyakov Y.* Labile carbon and nitrogen additions affect soil organic matter decomposition more strongly than temperature // *Appl. Soil Ecol.* – 2017. – V. 114. – P. 152–160. – doi: 10.1016/j.apsoil.2017.01.009.
9. *Hernández D., Fernández J.M., Plaza C., Polo A.* Water-soluble organic matter and biological activity of a degraded soil amended with pig slurry // *Sci. Total Environ.* – 2007. – V. 378, No 1–2. – P. 101–103. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.020.
10. *Plaza C., García-Gil J.C., Polo A.* Microbial activity in pig slurry amended soils under aerobic incubation // *Biodegradation* – 2007. – V. 18, No. 2. – P. 159–165. – doi: 10.1007/s10532-006-9051-0.
11. *Yanardağ I.H., Zornoza R., Bastida F., Büyükkiliç-Yanardağ A., García C., Faz A., Mermut A.R.* Native soil organic matter conditions the response of microbial communities to organic inputs with different stability // *Geoderma.* – 2017. – V. 295. – P. 1–9. – doi: 10.1016/j.geoderma.2017.02.008.
12. *Xu N., Tan G., Wang H., Gai X.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure // *Eur. J. Soil Biol.* – 2016. – V. 74. – P. 1–8. – doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.02.004.
13. *Zavalloni C., Alberti G., Biasiol S., Vedove G.D., Fornasier F., Liu J., Peressotti A.* Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study // *Appl. Soil Ecol.* – 2011. – V. 50. – P. 45–51. – doi: 10.1016/j.apsoil.2011.07.012.
14. *Zornoza R., Acosta J.A., Faz A., Bååth E.* Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation // *Geoderma.* – 2016. – V. 272. – P. 64–72. – doi: 10.1016/j.geoderma.2016.03.007.
15. *Eilers K.G., Lauber C.L., Knight R., Fierer N.* Shifts in bacterial community structure associated with inputs of low molecular weight carbon compounds to soil // *Soil Biol. Biochem.* – 2010. – V. 42, No 6. – P. 896–903. – doi: 10.1016/j.soilbio.2010.02.003.
16. *Blagodatskaya E., Yuyukina T., Blagodatsky S., Kuzyakov Y.* Three-source-partitioning of microbial biomass and of CO₂ efflux from soil to evaluate mechanisms of priming effects // *Soil Biol. Biochem.* – 2011. – V. 43, No 4. – P. 778–786. – doi: 10.1016/j.soilbio.2010.12.011.

17. *De Nobili M., Contin M., Mondini C., Brookes P.C.* Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate // *Soil Biol. Biochem.* – 2001. – V. 33, No 9. – P. 1163–1170. – doi: 10.1016/S0038-0717(01)00020-7.
18. *Dalenberg J.W., Jager G.* Priming effect of small glucose additions to ¹⁴C-labelled soil // *Soil Biol. Biochem.* – 1981. – V. 13, No 3. – P. 219–223. – doi: 10.1016/0038-0717(89)90157-0.
19. *Subedi R., Taupe N., Ikovi I., Bertora C., Zavattaro L., Schmalenberger A., Leahy J.J., Grignani C.* Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar // *Sci. Total Environ.* – 2016. – V. 550. – P. 924–933. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.160.
20. *Khan S., Cao Q., Hesham Ael.-L., Xia Y., He J.Z.* Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb // *J. Environ. Sci. (China)*. – 2007. – V. 19, No 7. – P. 834–840. – doi: 10.1016/S1001-0742(07)60139-9.
21. *Zoghalmi R.I., Hamdi H., Mokni-Tlili S., Khelil M.N., Ben Aissa N., Jedidi N.* Changes in light-textured soil parameters following two successive annual amendments with urban sewage sludge // *Ecol. Eng.* – 2016. – V. 95. – P. 604–611. – doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.103.
22. *Healy M.G., Ryan P.C., Fenton O., Peyton D.P., Wall D.P., Morrison L.* Bioaccumulation of metals in ryegrass (*Lolium perenne* L.) following the application of lime stabilised, thermally dried and anaerobically digested sewage sludge // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 2016. – V. 130. – P. 303–309. – doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.04.026
23. *Giller K.E., Witter E., McGrath S.P.* Heavy metals and soil microbes // *Soil Biol. Biochem.* – 2009. – V. 41, No 10. – P. 2031–2037.
24. *Charlton A., Sakrabani R., Tyrrel S., Rivas Casado M., McGrath S.P., Crooks B., Cooper P., Campbell C.D.* Long-term impact of sewage sludge application on soil microbial biomass: An evaluation using meta-analysis // *Environ. Pollut.* – 2016. – V. 219. – P. 1021–1035. – doi: 10.1016/j.envpol.2016.07.050.
25. *Epelde L., Muñiz O., Garbisu C.* Microbial properties for the derivation of critical risk limits in cadmium contaminated soil // *Appl. Soil Ecol.* – 2016. – V. 99. – P. 19–28. – doi: 10.1016/j.apsoil.2015.11.014.
26. *Galitskaya P.Y., Saveliev A.A., Selivanovskaya S.Y.* Response of soil microbial community to the simultaneous influence of metals and an organic substance // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2015. – V. 8, No 6. – P. 780–788. – doi: 10.1134/S1995425515060062.
27. *Vig K., Megharaj M., Sethunathan N., Naidu R.* Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review // *Adv. Environ. Res.* – 2003. – V. 8, No 1. – P. 121–135. – doi: 10.1016/S1093-0191(02)00135-1.
28. ISO 14235:1998. Soil quality – Determination of organic carbon by sulfochromic oxidation. – 1998. – 5 p.
29. ISO 14240-2. Soil quality – Determination of soil microbial biomass – Part 2: Fumigation-extraction method. – 1997. – 10 p.
30. ISO 16072. Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial soil respiration. – 2002. – 19 p.
31. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. – Vienna, Austria. – URL: <https://www.R-project.org/>.
32. *Barajas-Aceves M.* Comparison of different microbial biomass and activity measurement methods in metal-contaminated soils // *Biores. Technol.* – 2005. – V. 96, No 12. – P. 1405–1414. – doi: 10.1016/j.biortech.2004.09.013.

33. *Niemeyer J.C., Lolata G.B., Carvalho G.M., Da Silva E.M., Sousa J.P. Nogueira M.P.* Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil // *Appl. Soil Ecol.* – 2012. – V. 59. – P. 96–105. – doi: 10.1016/j.apsoil.2012.03.019.
34. *Spohn M., Chodak M.* Microbial respiration per unit biomass increases with carbon-to-nutrient ratios in forest soils // *Soil Biol. Biochem.* – 2015. – V. 81. – P. 128–133. – doi: 10.1016/j.soilbio.2014.11.008.

Поступила в редакцию
15.08.17

Селивановская Светлана Юрьевна, доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

Гильмуллина Алия Рамилевна, аспирант кафедры прикладной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gilmullinaar@mail.ru

Кузяков Яков Викторович, PhD, заведующий кафедрой почвоведения экосистем умеренного пояса

Гёттингенский университет имени Георга-Августа
пл. Вильгельмсплатц (Wilhelmsplatz), д. 1, г. Гёттинген, 37073, Германия
E-mail: kuzyakov@gwdg.de

Галицкая Полина Юрьевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры прикладной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gpolina33@yandex.ru

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2017, vol. 159, no. 4, pp. 589–601

Carbon Fluxes in Soil Systems Supplemented with Glucose and Cadmium

S.Y. Selivanovskaya^{a}, A.R. Gilmullina^{a**}, Y.V. Kuzyakov^{b***}, P.Y. Galitskaya^{a****}*

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

^bUniversity of Göttingen, Göttingen, 37073 Germany

E-mail: *svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru, **gilmullinaar@mail.ru,

kuzyakov@gwdg.de, *gpolina33@yandex.ru

Received August 15, 2017

Abstract

Carbon fixation in soil, its transformation and mineralization are the important stages of carbon cycle regulating soil fertility and ecosystem stability. Organic fertilizers and toxic substances, such as heavy metals, lead to changes in the natural carbon flux. Organic and soluble organic carbon contents, microbial biomass, and cumulative respiratory activity have been measured for soils influenced by glucose

and cadmium addition and sampled from various depths. Soluble organic compounds (here glucose) lead to a strong increase in metabolic activity, but they cause no carbon fixation in soil in the form of microbial biomass or insoluble compounds. The introduction of heavy metals into the soil has reduced the carbon flux rate through the soluble carbon pool, but has left the microbial biomass carbon unaffected. These effects turned out to be more pronounced in subsoils (below 20 cm) having low organic matter content.

Keywords: carbon flux, soil ecology, cadmium, glucose, heavy metals

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 15-04-04520) and the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

Fig. 1. The cumulative release of CO₂ from the soil samples and the effect of addition of glucose and cadmium.

Fig. 2. Changes in the organic carbon content upon the incubation of soil samples supplemented with glucose and cadmium and without them.

Fig. 3. Changes in the microbial biomass upon the incubation of soil samples supplemented with glucose and cadmium and without them.

Fig. 4. Changes in the content of soluble organic matter upon the incubation of soil samples supplemented with glucose and cadmium and without them.

References

1. Moinet G.Y.K., Cieraad E., Turnbull M.H., Whitehead D. Effects of irrigation and addition of nitrogen fertiliser on net ecosystem carbon balance for a grassland. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 579, pp. 1715–1725. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.199.
2. Song Y., Zou Y., Wang G., Yu X. Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis. *Soil Biol. Biochem.*, 2017, vol. 109, pp. 35–49. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.01.020.
3. Liao C., Peng R., Luo Y., Zhou X., Wu X., Fang C., Chen J., Li B. Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: A meta-analysis. *New Phytol.*, 2008, vol. 177, pp. 706–714. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02290.x.
4. Blagodatskaya E.V., Blagodatsky S.A., Anderson T.-H., Kuzyakov Y. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies. *Appl. Soil Ecol.*, 2007, vol. 37, nos. 1–2, pp. 95–105. doi: 10.1016/j.apsoil.2007.05.002.
5. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 7–20. doi: 10.1023/A:1006247623877.
6. Abaye D.A., Brookes P.C. Relative importance of substrate type and previous soil management in synthesis of microbial biomass and substrate mineralization. *Eur. J. Soil Sci.*, 2006, vol. 57, no. 2, pp. 179–189. doi: 10.1111/j.1365-2389.2005.00727.x.
7. Wang J., Xiong Z., Yan X., Kuzyakov Y. Carbon budget by priming in a biochar-amended soil. *Eur. J. Soil Biol.*, 2016, vol. 76, pp. 26–34. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.07.003.
8. Li Q., Tianc Y., Zhanga X., Xua X., Wanga H., Kuzyakov Y. Labile carbon and nitrogen additions affect soil organic matter decomposition more strongly than temperature. *Appl. Soil Ecol.*, 2017, vol. 114, pp. 152–160. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.01.009.
9. Hernández D., Fernández J.M., Plaza C., Polo A. Water-soluble organic matter and biological activity of a degraded soil amended with pig slurry. *Sci. Total Environ.*, 2007, vol. 378, nos. 1–2, pp. 101–103. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.020.
10. Plaza C., García-Gil J.C., Polo A. Microbial activity in pig slurry amended soils under aerobic incubation. *Biodegradation*, 2007, vol. 18, no. 2, pp. 159–165. doi: 10.1007/s10532-006-9051-0.
11. Yanardağ I.H., Zornoza R., Bastida F., Büyükkiliç-Yanardağ A., García C., Faz A., Mermut A.R. Native soil organic matter conditions the response of microbial communities to organic inputs with different stability. *Geoderma*, 2017, vol. 295, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.02.008.

12. Xu N., Tan G., Wang H., Gai X. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *Eur. J. Soil Biol.*, 2016, vol. 74, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.02.004.
13. Zavalloni C., Alberti G., Biasiol S., Vedove G.D., Fornasier F., Liu J., Peressotti A. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Appl. Soil Ecol.*, 2011, vol. 50, pp. 45–51. doi: 10.1016/j.apsoil.2011.07.012.
14. Zornoza R., Acosta J.A., Faz A., Bååth E. Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation. *Geoderma*, 2016, vol. 272, pp. 64–72. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.03.007.
15. Eilers K.G., Lauber C.L., Knight R., Fierer N. Shifts in bacterial community structure associated with inputs of low molecular weight carbon compounds to soil. *Soil Biol. Biochem.*, 2010, vol. 42, no. 6, pp. 896–903. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.02.003.
16. Blagodatskaya E., Yuyukina T., Blagodatsky S., Kuzyakov Y. Three-source-partitioning of microbial biomass and of CO₂ efflux from soil to evaluate mechanisms of priming effects. *Soil Biol. Biochem.*, 2011, vol. 43, no. 4, pp. 778–786. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.12.011.
17. De Nobili M., Contin M., Mondini C., Brookes P.C. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, vol. 33, no. 9, pp. 1163–1170. doi: 10.1016/S0038-0717(01)00020-7.
18. Dalenberg J.W., Jager G. Priming effect of small glucose additions to 14C-labelled soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1981, vol. 13, no. 3, pp. 219–223. doi: 10.1016/0038-0717(89)90157-0.
19. Subedi R., Taupe N., Ikovi I., Bertora C., Zavattaro L., Schmalenberger A., Leahy J.J., Grignani C. Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar. *Sci. Total Environ.*, 2016, vol. 550, pp. 924–933. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.160.
20. Khan S., Cao Q., Hesham Ael.-L., Xia Y., He J.Z. Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb. *J. Environ. Sci.*, 2007, vol. 19, no. 7, pp. 834–840. doi: 10.1016/S1001-0742(07)60139-9.
21. Zoghalmi R.I., Hamdi H., Mokni-Tlili S., Khelil M.N., Ben Aissa N., Jedidi N. Changes in light-textured soil parameters following two successive annual amendments with urban sewage sludge. *Ecol. Eng.*, 2016, vol. 95, pp. 604–611. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.103.
22. Healy M.G., Ryan P.C., Fenton O., Peyton D.P., Wall D.P., Morrison L. Bioaccumulation of metals in ryegrass (*Lolium perenne* L.) following the application of lime stabilised, thermally dried and anaerobically digested sewage sludge. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2016, vol. 130, pp. 303–309.
23. Giller K.E., Witter E., McGrath S.P. Heavy metals and soil microbes. *Soil Biol. Biochem.*, 2009, vol. 41, no. 10, pp. 2031–2037.
24. Charlton A., Sakrabani R., Tyrrel S., Rivas Casado M., McGrath S.P., Crooks B., Cooper P., Campbell C.D. Long-term impact of sewage sludge application on soil microbial biomass: An evaluation using meta-analysis. *Environ. Pollut.*, 2016, vol. 219, pp. 1021–1035. doi: 10.1016/j.envpol.2016.07.050
25. Epelde L., Muñiz O., Garbisu C. Microbial properties for the derivation of critical risk limits in cadmium contaminated soil. *Applied Soil Ecol.*, 2016, vol. 99, pp. 19–28. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.11.014.
26. Galitskaya P.Y., Saveliev A.A., Selivanovskaya S.Y. Response of soil microbial community to the simultaneous influence of metals and an organic substance. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 780–788. doi: 10.1134/S1995425515060062.
27. Vig K., Megharaj M., Sethunathan N., Naidu R. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: A review. *Adv. Environ. Res.*, 2003, vol. 8, no. 1, pp. 121–135. doi: 10.1016/S1093-0191(02)00135-1.
28. ISO 14235:1998. Soil Quality – Determination of Organic Carbon by Sulfochromic Oxidation. 1998. 5 p.
29. ISO 14240-2. Soil Quality – Determination of Soil Microbial Biomass. Part 2: Fumigation-Extraction Method. 1997. 10 p.
30. ISO 16072. Soil Quality – Laboratory Methods for Determination of Microbial Soil Respiration. 2002. 19 p.

31. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/>.
32. Barajas–Aceves M. Comparison of different microbial biomass and activity measurement methods in metal–contaminated soils. *Biores. Technol.*, 2005, vol. 96, no. 12, pp. 1405–1414. doi: 10.1016/j.biortech.2004.09.013.
33. Niemeyer J. C., Lolata G. B., Carvalho G. M., Da Silva E. M., Sousa J. P. Nogueira M. P. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. *Appl. Soil Ecol.*, 2012, vol. 59, pp. 96–105. doi: 10.1016/j.apsoil.2012.03.019.
34. Spohn M., Chodak M. Microbial respiration per unit biomass increases with carbon-to-nutrient ratios in forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2015, vol. 81, pp. 128–133. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.11.008.

⟨ **Для цитирования:** Селивановская С.Ю., Гильмуллина А.Р., Кузяков Я.В., Галицкая П.Ю. Поток углерода в почвенных системах при внесении глюкозы и кадмия // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 589–601. ⟩

⟨ **For citation:** Selivanovskaya S.Y., Gilmullina A.R., Kuzyakov Y.V., Galitskaya P.Y. Carbon fluxes in soil systems supplemented with glucose and cadmium. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 589–601. (In Russian) ⟩