

УДК 574.4:581.524

МАЛОИЗВЕСТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЧВЕННОЙ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ТАЁЖНЫХ ЛЕСАХ

© 2017 г. Д. В. Карелин^{1,2,3,*}, Д. Г. Замолодчиков^{1,3}, академик РАН А. С. Исаев³

Поступило 12.04.2017 г.

В результате многолетнего мониторинга в таёжной зоне показано, что известные внешние воздействия, приводящие к ослаблению и гибели деревьев, являются дополнительными и спорадическими, но существенными источниками почвенной эмиссии CO₂, к которым относятся: выделение CO₂ из прикорневых участков в результате усыхания древостоя елей; увеличение почвенной эмиссии CO₂ в ответ на падение крупных стволов во время ветровалов; импульсное выделение CO₂ в результате “эффекта Бёрча” (Birch effect). Вклад этих импульсных воздействий в общий поток дыхания экосистем на региональном и глобальном уровнях может быть значительным, что требует их учёта.

DOI: 10.7868/S0869565217220248

В области глобальной экологии растущее внимание продолжает уделяться уточнению оценок потоков диоксида углерода и метана, составляющих круговорот углерода между сушей и атмосферой в связи с антропогенными трендами и естественной цикличностью климата [1]. В частности, за последние три десятилетия удалось выявить рост чистой первичной продукции, что выражается в увеличении индекса листовой поверхности за 1982–2009 гг. [2], и обнаружить прирост глобального дыхания почв со скоростью 0,1 Гт С в год [3] за 1970–2009 гг. Эти параллельные тренды двух главных и противоположных по направленности потоков углерода на суше объясняются общей реакцией наземной растительности на увеличение концентрации CO₂ в атмосфере [2] и на рост температуры [3]. В то же время не менее важно изучение эпизодических и нерегулярных или малых по площади составляющих атмосферных потоков углерода, связанных в основном с экстремальными (погодными или антропогенными) факторами, вклад которых пока проявляется в небольших пространственных и (или) временных масштабах [4]. Действительно, многие из ныне ставших глобальными слагаемых потоков парниковых газов ещё недавно были их

малыми составляющими, зависящими от антропогенной деятельности (например, селитебные, горнодобывающие и транспортные урбанизированные участки, пашни, рисовые чеки, животноводство, лесные пожары и т.д.).

В настоящем исследовании на основе камерных и микропульсационных измерений, проведённых в 2009–2016 гг. в экосистемах таёжной зоны (Новгородская обл., Валдайский р-н, исследовательский полигон ВФ ГГИ Росгидромета РФ), были выявлены 3 формы малоизвестных импульсных (малых) составляющих почвенной эмиссии, которые могут иметь широкое региональное значение.

Дополнительное выделение CO₂ из почвы в результате патогенного (климатогенного) усыхания древостоя. В ходе многолетних наблюдений за почвенной эмиссией CO₂ в южно-таёжных перестойных ельниках мы впервые обнаружили факт локального (в пределах 1–2 м² вокруг стволов), но значительного (в 3 раза выше фонового) и длительного (круглогодично, на протяжении не менее 5 лет) усиления эмиссии в прикорневой зоне сухостойных стволов елей, погибших в результате засух и последующих эпидемий, вызванных корневой губкой и жуками-ксилофагами (рис. 1). Наиболее вероятной причиной данного явления является активизация дыхания патогенной грибной флоры в ризосфере погибших корней. Обнаруженный нами эффект является дополнительным фактором существенного увеличения на 20–25% эмиссии CO₂ из почвы для площадей еловых лесов с распадом древостоя при характерной

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт географии Российской Академии наук, Москва

³ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской Академии наук, Москва

*E-mail: dkarelin7@gmail.com

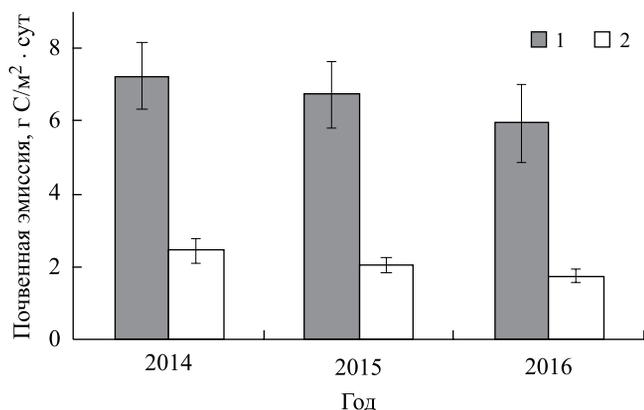


Рис. 1. Изменения почвенной эмиссии CO₂ из пристволовых участков сухостоя ели (1) и фонового уровня (2) в 2014–2016 гг. Использованы измерения в одних и тех же точках опытной площадки с распадом древостоя. Наблюдения за апрель–ноябрь. $M \pm m$, $n = 10$ для каждой точки.

для зрелой южной тайги плотности стволов. Это важно при учёте влияния массовых климатогенных ветровалов (когда корни остаются в земле) или биогенной гибели древостоя. На территории России площади лесных насаждений с усыханием древостоя от разных причин (пожары, ветровалы, засухи, фитофаги и проч.) составляют сейчас около 11 млн га [5].

Импульсное выделение CO₂ в результате “эффекта Бёрча”. Данная эмиссия CO₂ считается характерной для экосистем с выраженными засушливыми сезонами. Однако наши исследования показали, что феномен импульсного выделения CO₂ распространён гораздо шире, чем

считалось ранее, и может отмечаться в гумидных лесных экосистемах в периоды, следующие за кратковременными засухами. В сезоне 2010 г. после аномальной 34-дневной засухи и жары первый же (2,3 мм) дождь 29 июля, который лишь увлажнил верхний слой подстилки, вызвал мощное импульсное выделение CO₂, которое продолжалось несколько часов и превысило текущий уровень *NEE* (Net Ecosystem Exchange, чистый поток углерода) для всего леса, оцениваемый над кронами деревьев, от $-0,81$ до $89,1$ г C/m² · сут, что соответствует повышению ночного *NEE* за эти сутки в 30 раз (рис. 2). Мы объясняем это “эффектом Бёрча” [6], где в качестве механизма обычно рассматривается появление в почве доступных для микроорганизмов углерода и азота [7]. Тот факт, что этот скачок обусловлен именно почвенным дыханием, подтверждается тем обстоятельством, что его доля в вегетационный период составила, по нашим оценкам, от 61,6 до 90,2% от валового дыхания, оцениваемого по ночному уровню *NEE*. Кроме того, в нашем случае это не методический артефакт влияния осадков, известный из работы [8], посвящённой ограничениям так называемого “открытого” метода турбулентных пульсаций. Проводимые нами на той же лесной площади эксперименты по искусственному усилению “эффекта Бёрча” с добавлением стандартных количеств дистиллированной воды в уже иссушенную засухой почву показали сходные значения показателей усиления эмиссии. Региональные масштабы выделения CO₂ из почвы в результате “эффекта Бёрча” могут быть огромны. Так, во время летнего антициклона 2010 г. под

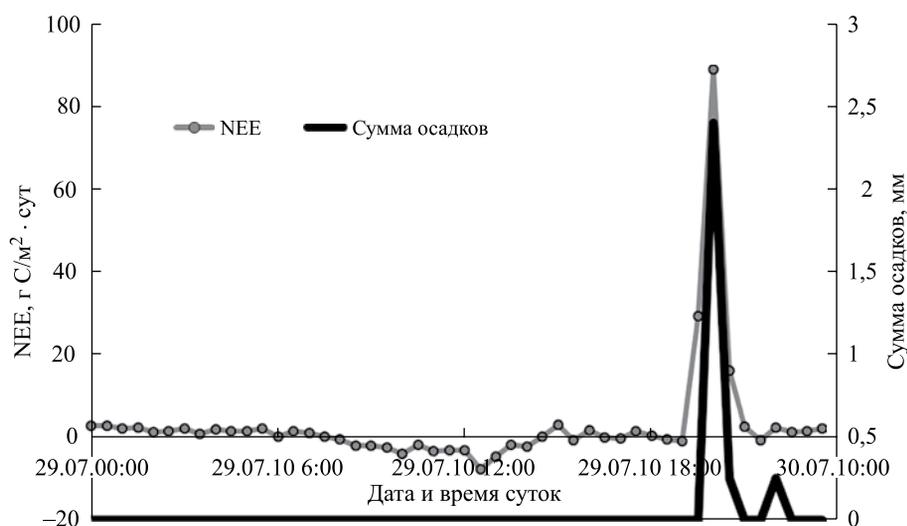


Рис. 2. Импульсное выделение CO₂ 29 июля 2010 г. в течение 2–3 ч в результате выпадения 2,3 мм осадков после околемесячной засухи, в ходе которой объёмная влажность почвы ельника (полигон “Таёжный лог” Валдайского филиала ФГБУ ГГИ Росгидромета РФ) в слое 0–6 см снизилась с 18 до 4%. Отрицательные значения чистого потока углерода обозначают его сток в экосистему из атмосферы.

влиянием засухи находилась вся европейская территория России. Поэтому при использовании характерных для зональных экосистем значений усиления эмиссии, согласно нашим расчётам, общий дополнительный выброс в атмосферу в 2010 г. за счёт этого эффекта мог увеличить среднегодовую почвенную эмиссию на европейской территории России на 22% (!).

Увеличение почвенной эмиссии CO_2 в ответ на падение крупных стволов во время ветровалов. Это явление пока наименее изучено, хотя ветровалы ослабленных древостоев обычны в бореальных лесах и начинаются уже при скоростях ветра более 8 м/с, а при скорости более 20 м/с начинается массовый вывал [9]. В сезоне 2012 г. мы впервые инструментально зафиксировали выброс CO_2 из почвы в ответ на падение крупной ели в период ветровала 13–14 августа. Этот выброс (рис. 3), достигающий 4-кратного превышения обычного среднемесячного уровня почвенной эмиссии CO_2 в ходе вегетационного сезона, продолжался не менее 5 сут. Площадь выброса соответствовала площади покрытия упавшим стволом (10–30 м²). Благодаря этому мы теперь знаем, что следует внимательно оценивать результаты крупных сезонных ветровалов для оценки эмиссии CO_2 . Вероятнее всего, это связано с физическим высвобождением CO_2 из почвы в результате десорбции [10] и (или) со стимуляцией деятельности микроорганизмов вследствие усиления аэрации почвенных пор, что затем приводит к истощению субстрата. Отмеченное явление следует рассматривать как крайне локальное по площади (десятки квадратных метров), обусловленное прямым воздействием падения ствола дерева и ограниченное по времени (до нескольких суток), как и в случае “эффекта Бёрча”. Учитывая последующее падение эмиссии ниже фонового уровня, эффект, скорее всего, компенсируется на уровне годовых потоков CO_2 , но при этом может иметь большое значение в региональных масштабах в отдельные периоды. Так, в годы ураганов (2009–2010 гг.) площади сплошных ветровалов в лесной зоне европейской территории России достигли десятков миллионов гектаров в год [9]. При этом в период потепления площади ветровалов увеличивались [11].

Против необходимости учёта “малых” составляющих потоков дыхания экосистем свидетельствует то, что эти дополнительные потоки должны компенсироваться в ходе формирования годового баланса, поскольку дополнительный углерод, поступивший с эмиссией, расходуется, прежде всего, на местный фотосинтез. Однако это справедливо пока существенно не меняется внутригодовая частота таких редких явлений или остаётся малой их площадь. В частности, “эффект Бёрча” зависит не

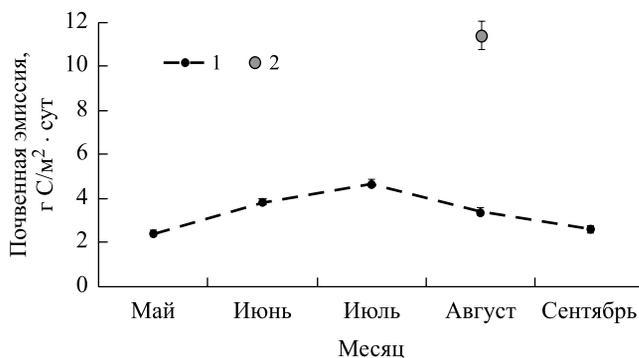


Рис. 3. Изменчивость почвенной эмиссии CO_2 по данным наблюдений за май–сентябрь 2009–2012 гг. в южно-таёжном ельнике-кисличнике (полигон “Таёжный лог” Валдайского филиала ФГБУ ГГИ Росгидромета РФ). Указаны фоновые среднемесячные значения (1) и 5-дневный десорбционный выброс CO_2 (2), вызванный падением ели во время ветровала 13–14 августа 2012 г. $M \pm m$, $n = 4–32$.

столько от генетических особенностей зональных почв европейской части России, сколько от частоты летних засух [12], а частота и площади ветровалов прямо связаны с частотой экстремальных (прежде всего, ветровых) явлений, которая прямо пропорциональна температуре в четвёртой степени [13]. С другой стороны, повышение температуры приводит к ослаблению иммунитета древостоя и его последующей гибели от фитофагов и патогенных микроорганизмов, а также к изменению местного режима выпадения осадков. Эти взаимосвязанные факторы в конечном итоге зависят от растущего антропогенного вклада во всех масштабах. Кроме того, немаловажно, какой именно углерод поступает за год из экосистемы в атмосферу. Это может быть более “старый” углерод в составе CO_2 , десорбированный из почвы в результате падения деревьев, или относительно “новый” углерод, поступивший в атмосферу в результате окисления вещества свежего отпада корней, или через ускорение круговорота углерода, находящегося в составе массы отмершей микробиоты.

Таким образом, все известные внешние деструктивные воздействия, приводящие к гибели деревьев (ветровалы, атаки фитофагов и микропаразитов), а также засухи, приводящие к их ослаблению, являются дополнительными источниками CO_2 , ускоряющими круговорот углерода в бореальных лесных экосистемах. Вклад этих воздействий в общий поток дыхания зависит от пространственно-временных масштабов их проявления, что, в свою очередь, определяется растущим местным, региональным и глобальным антропогенным влиянием и естественными изменениями климата.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 16–17–00123 и РФФИ 16–04–01580.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zamolodchikov D.G.* // ДАН. 2014. Т. 456. № 3. P. 351–354.
2. *Zaichun Zhu, Shilong Piao, et al.* // Nature Climate Change. Published online 25 April 2016.
3. *Bond-Lamberty B., Thomson A.* // Nature. 2010. V. 464. P. 579–582.
4. *Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L.* // Contemp. Probl. Ecol. 2014. V. 7. P. 743–751. doi: 10.1134/S1995425514070063.
5. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов в Российской Федерации в 2015 году и прогноз лесопатологической ситуации на 2016 год. Пушкино: Федеральное агентство лесного хозяйства ФБУ “Российский Центр защиты леса”, 2016, 145 с.
6. *Birch H.F.* // Plant & Soil. 1958. V. 10. P. 9–31.
7. *Unger S., Máguas C., Pereira J.S., David T.S., Werner C.* // Soil Biol. and Biochem. 2010. V. 42. Iss. 10. P. 1800–1810.
8. *Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авиллов В.К., Мамкин В.В.* Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
9. *Крылов А.М., Малахова Е.Г., Владимирова Н.А.* // Изв. СПб. лесотехн. академии. 2012. № 200. P. 197–207.
10. *Smagin A.V., Dolgikh A.V., Karelin D.V.* // Eurasian Soil Sci. 2016. V. 49. № 4. P. 450–456.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.
12. *Karelin D.V., Chestnykh O.V., Rostovceva E.L.* Proc. European Geosci. Union General Assembly. Vienna, 17–22 April 2016. Vienna, 2016. P. 136.
13. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Rept. Contribution of Working Groups I, II and III to the V Assessment Rept of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.