*А.В. Махныкина, Д.А. Полосухина, Д.Н. Коркина,
Н.Н. Кошурникова, А.С. Прокушкин*

ЛИМИТУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПОЧВЕННОЙ ЭМИССИИ В ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ*

Количество осадков или условия увлажнения территории являются основным лимитирующим фактором для всех биологических процессов в бореальных лесах [IPCC, 2001]. Почвенная эмиссия CO_2 (R_s), как один из основных потоков углерода в экосистеме, существенно влияет на функциональную роль территории, меняя ее качественные характеристики из стока в дополнительный источник углерода [Davidson et al., 1998].

На сегодняшний день, большое число исследований указывают на то, что почвенная эмиссия CO_2 в экосистемах, лимитированных поступлением воды, имеет импульсный ответ на поступление осадков [Yuste et al., 2003; Jarvis et al., 2007]. Влажность почвы может влиять на R_s нелинейно (параболически), ограничивая корневую и микробную активность в почве при низких уровнях влажности почвы и ограничивая коэффициент диффузии CO_2 при высоких уровнях влажности почвы [Orchard and Cook, 1983; Maier et al., 2010]. Основное влияние условий увлажнения отмечается в течение вегетационного сезона, когда в наиболее активной фазе находятся все биогеохимические реакции [Yuste et al., 2003].

Сезонная динамика содержания воды в почве может варьироваться от года к году и влиять на значение Q_{10} [Davidson et al., 1998]. Было высказано предположение о том, что небольшое отклонение в Q_{10} может вызвать значительное смещение в оценке R_s [Xu и Qi, 2001]. Таким образом, применение Q_{10} в прогнозировании будущих потерь CO_2 из почвы без учета годовых и сезонных колебаний определенных факторов (включая влажность почвы) может привести к значительным ошибкам. Кроме того, сезонная зависимость R_s от содержания воды в почве до сих пор плохо изучена, поскольку изменения температуры почвы и содержания воды часто коррелируют, а независимое влияние каждой переменной трудно обнаружить или интерпретировать [Davidson et al., 1998].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (18-34-00736).

Целью данной работы было рассмотреть влияние количества осадков, как основного лимитирующего фактора, на изменение скорости почвенной эмиссии в таежных лесах Центральной Сибири.

Район исследования находится в пределах Кеть-Сымской низменности на левобережье реки Енисей. Основным фактором распределения растительных сообществ в данном районе является уровень грунтовых вод, определяющий степень увлажнения местообитаний. Структура почвенного покрова изучаемой территории определяется особенностями рельефа и почвообразующих пород. На участках, где доминируют сосняки лишайниковые, почвенный покров представлен иллювиально-железистыми песчаными подзолами [Классификация и диагностика, 1977]. Климат региона резко континентальный. Согласно долгосрочным измерениям, полученным на метеорологической станции «Бор» (www.meteo.ru) среднегодовая температура воздуха составляет -3.5°C . Сумма температур выше 10°C составляет $800\text{--}1200^{\circ}\text{C}$, гидротермический коэффициент – $1.2\text{--}1.6$. Абсолютная минимальная температура воздуха -54°C , абсолютная максимальная температура $+36^{\circ}\text{C}$. Амплитуда колебания среднемесячных температур может достигать 42°C . Среднегодовая относительная влажность воздуха 76 %. Сумма атмосферных осадков за год в среднем составляет 590 мм [Плешиков и др., 2002].

Экспериментальные работы по внесению дифференцированного количества осадков проводились в течение вегетационного сезона (июнь–сентябрь) в 2015, 2016 и 2018 гг. В качестве объектов исследования были выбраны сосновые биогеоценозы, сформированные на песчаных подзолах, которые занимают около 16% территории. Данный тип леса отличается повышенной эксплуатационной нагрузкой со стороны лесного хозяйства и нуждается в подробном изучении. Суть эксперимента заключалась в дифференцированном внесении количества осадков после каждого случая атмосферных осадков (дождя). Были выбраны 4 уровня по количеству осадков – 0%, 25%, 50% и 100% (естественные условия увлажнения) от выпавшего количества осадков. Дополнительно со второго года эксперимента был введен участок с постоянным уровнем влажности почв в 30%, при которой наблюдались максимальные величины потоков CO_2 . Внесение осадков осуществлялось после каждого дождя. Измерения почвенной эмиссии проводились через 8 часов после внесения осадков. Непосредственно измерения почвенной эмиссии CO_2 осуществлялись при помощи

инфракрасного газоанализатора LI-A8100 (Li-cor Biogeosciences Inc., США). Температура почвы измерялась на трех глубинах – 5, 10 и 15 см, используя датчик температуры почвы Soil Temperature Probe Type E (Omega, США). Влажность почв фиксировалась используя влагомер Theta Probe Model ML2 (Delta T Devices Ltd., Великобритания) на глубине 5 см от поверхности почвы (без напочвенного покрова).

Коэффициент температурной чувствительности Q_{10} был рассчитан по уравнению Вант-Гоффа [Van't Hoff, 1898]:

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\left(\frac{10}{T_2 - T_1} \right)},$$

где T_1 и T_2 – температура почвы, R_1 и R_2 – поток CO_2 из почвы при температуре T_1 и T_2 .

Рис. 1. Метеорологические условия сезонов измерений в сравнении со средними многолетними значениями: а) количество осадков; б) температура воздуха.

Данные по температуре представляют собой среднемесячные значения со стандартными отклонениями. Источник – <http://www.meteo.ru>, <http://www.rp5.ru>

Сезоны проведения экспериментальных работ заметно отличались по метеорологическим условиям (рис. 1). При сравнении со средними многолетними значениями по количеству осадков за сезон (июнь-сентябрь), в 2015 году почти на всем протяжении сезона норма осадков превышена вдвое, исключение составляет лишь начало сезона. Следующий сезон напротив демонстрирует противоположные условия увлажнения, сумма осадков в начале (июнь) и в конце сезона (сентябрь) в 3 раза была ниже среднемноголетних значений. Сезон 2018 года был засушлив, в начале сезона количество осадков составляло всего 26% от среднемноголет-

ней нормы осадков, в июле – 66%, в августе – 83%, а к концу сезона – превысило на 11% средние значения.

Что касается температурных условий, то здесь не наблюдается таких значительных различий. В начале сезона (июнь) для всех сезонов температура воздуха на 4.7 ± 0.8 °C превышает среднемноголетние значения. Следующим отличие наблюдается для двух сезонов 2016 и 2018 гг., в конце сезона (сентябрь) отмечено превышение среднемноголетних значений на 52 и 26% соответственно.

Метеорологические условия сезона, и в частности условия увлажнения, оказали воздействие на величину потока CO_2 из почвы, максимальные значения потока CO_2 наблюдались в сезон 2015 года (рис. 2), с наибольшим количеством выпавших атмосферных осадков. Интересен тот факт, что максимальные потоки CO_2 в сезон 2015 были зафиксированы для группы 0%, т.е. без внесения осадков в течение сезона – 0.8 ± 0.08 кг С м⁻². Сходные значения были получены для сосновых лесов Финляндии [Niinistö et al., 2011], почвенная эмиссия за бесснежных период наблюдений достигала 1.5 кг CO_2 м⁻². В сезоны 2016 и 2018 гг., напротив, в данной группе были отмечены минимальные потоки. Подобная зависимость предположительно может являться проявлением стресс-реакции на условия полной засухи [Lee et al., 2004, Silva et al., 2019]. Средней скоростью эмиссии характеризуется участок с 25% от выпавшего количества осадков. Для участков с 50 и 100% от выпавшего количества осадков измеренные значения почвенной эмиссии были на 43 и 44% соответственно ниже, чем на участке без внесения осадков, что может быть следствием ингибирования потоков CO_2 при перенасыщении почвы влагой.

Для 2016 и 2018 гг. проведения эксперимента были получены значительно отличающиеся результаты. Идентифицировать участок с максимальной почвенной эмиссией было достаточно сложно. Здесь не наблюдалось значимых ($p < 0.05$) различий между средними сезонными величинами потоков. В сезон 2016 года не отмечено существенных различий в потоках CO_2 между различными участками по уровню увлажнения, однако можно выделить, что наибольшими потоками характеризуется участок с постоянной влажностью в 30% – 0.45 ± 0.02 кг С м⁻². В сезон 2018 года уже для двух групп по уровню осадков установлены максимальные потоки – для 50% от выпавшего количества осадков и для участка с постоянной влажностью и составили по 0.43 ± 0.04 кг С м⁻².

Зависимость потока CO_2 от гидротермических условий почв различалась между участками и сезонами. Установлено, что сильная зависимость (R^2) между потоком CO_2 и температурой почвы наблюдалась на участке с 25% от количества выпавших атмосферных осадков (рис. 3). При дальнейшем рассмотрении удалось выявить, при каких значениях влажности почв, связь эмиссии и температуры почвы будет максимальной. Было обнаружено, что прослеживается следующая закономерность: чем больше количество дней с влажностью почв от 25 до 30%, тем сильнее зависимость потока CO_2 от температуры почвы. Ранее было отмечено, что влажность почв менее 10% ведет к угнетению микробиологической активности и как следствие снижению почвенной эмиссии [Orchard, Cook, 1983]. Также в комплексной работе по лесным территориям Германии [Meyer et al., 2018] было определено, что влажность почв выше и ниже 45% от почвенной влагоемкости снижает скорость почвенной эмиссии, однако данная зависимость соблюдается для определенного класса и типа почв.

Рис. 2. Сезонная эмиссии CO_2 из почв для участков с дифференцированным увлажнением. Данные представляют собой средние значения за сезон со стандартными ошибками

Рассмотрев гидротермический режим участков, был рассчитан коэффициент температурной чувствительности. При анализе, которого также можно проследить на условия увлажнения участка и сезона в целом. Для сезона 2015 года отмечается самые высокие значения коэффициента Q_{10} , исключение составляет лишь сезон 2018 года, когда на участке с постоянной влажностью в 30% Q_{10} составил 4.3. Для 2015 и 2016 сезонов

максимальные значения Q_{10} отмечаются на участке с 25% от выпавшего количества атмосферных осадков, где и ранее была обнаружена наиболее сильная зависимость между почвенной эмиссией и температурой почвы, и составили соответственно 4.1 и 3.5. В сезон 2018 года, максимальное значение Q_{10} зафиксировано на участке с постоянной влажностью почв в 30%. В некоторых исследованиях сообщается о большой вариабельности Q_{10} для одних и тех же участков в течение вегетационного периода, например, от 1.98 до 5.00 для дерново-позолистых почв и от 1.7 до 6.2 для серых лесных почв [Курганова и др., 2006], что может быть связано с высокой чувствительностью к условиям увлажнения территории в течение вегетационного сезона. Полученные значения Q_{10} для сезона 2018 года сходны с оценкам, полученными для гетеротрофной составляющей почвенной эмиссии ($Q_{10}=2$ [Czimczik et al., 2005]), что может свидетельствовать о гетеротрофном происхождении выделяемого CO_2 .

Рис. 3. Взаимосвязь между температурой почвы и потоком CO_2 для участка с 25% от выпавшего количества осадков

Рис. 4. Коэффициент температурной чувствительности Q_{10} для участков с дифференцированным увлажнением

В рамках проведенного исследования было установлено, что изменения в количестве осадков может как ингибировать (при значительных количествах), так и интенсифицировать (оптимальные условия увлажнения) скорости почвенной эмиссии CO_2 . Метеорологические характеристики почвы в течение сезона могут менять силу своего участия в формировании почвенной эмиссии CO_2 . В ходе эксперимента были определены оптимальные условия увлажнения, при которых наблюдалась сильная зависимость между температурой почв и почвенной эмиссией CO_2 , т.е. не наблюдалось лимитирования по содержанию воды в почве.

Литература

1. Классификация и диагностика почв СССР. 1977. М, Колос.
2. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Сапронов Д.В. и др. 2006. Потоки и пулы углерода в залежных землях Подмосковья. Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Кудеяров В.Н. (ред.) М., Наука. 271–284.
3. Плешиков Ф.И., Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., и др. Лесные экосистемы Енисейского меридиана (исследования по международной геосферно-биосферной программе). 2002. Новосибирск. Наука. 356 с.
4. Czimczik C. I., Schmidt M. W. I., Schulze E.-D. 2005. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // *European J. of Soil Science*. 56, 417–428.
5. Davidson E.A., Belk E., Boone R.D., 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biol*. 4, 217–227.
6. IPCC 2001. Climate change 2001. In: Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 183–237.
7. Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Valentini R. et al. 2007. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The "Birch effect" // *Tree Physiology*. 27(7), 929-940.
8. Lee X., Wu H.J., Sigler J. et al. 2004. Rapid and transient response of soil respiration to rain // *Glob. Change Biol*. 2004. 10 (6), 1017–1026.
9. Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E. E., Holst J. 2010. Pore-space CO_2 dynamics in a deep, well-aerated soil // *European Journal of Soil Science*. 61, 877–887.

10. Meyer N., Meyer H., Welp G., Amelung W. 2018. Soil respiration and its temperature sensitivity (Q_{10}): Rapid acquisition using mid-infrared spectroscopy // *Geoderma*. 323, 31–40.
11. Niinistö S. M., Kellomäki S., Silvola J. 2011. Seasonality in a boreal forest ecosystem affects the use of soil temperature and moisture as predictors of soil CO₂ efflux // *Biogeosciences* 8, 3169–3186.
12. Orchard V. A., Cook F.J. 1983. Relationship between soil respiration and soil moisture // *Soil Biology and Biochemistry*. 15(4), 447-453.
13. Silva B. O., Moitinho M. R., Araújo Santos G. A. et al. 2019. Soil CO₂ emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations // *Soil & Tillage Research*. 186, 224–232.
14. Van't Hoff J. H. 1898. Lectures on Theoretical and Physical Chemistry // *Chemical Dynamics*. Part I, 224–229.
15. Xu M., Qi Y. 2001. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine Plantation in Northern California // *Global Change Biology*. 7(6), 667-677.
16. Yuste J.C., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L., Ceulemans R., 2003. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime forest. *Tree Physiol*. 23, 1263–1270.