ИЗМЕНЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ЭМИССИИ CO₂ В ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ: ОТ СУТОЧНОЙ ДО МЕЖСЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ

А.В. Махныкина¹, Д.А. Полосухина¹, Н.Н. Кошурникова¹, А.С. Прокушкин²

¹ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск

amakhnykina@sfu-kras.ru, dana_polo@mail.ru

natank1980@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru

Аннотация. Изучение почвенной эмиссии лесов бореальной зоны на сегодняшний день остается предметом научных дискуссий. Изменения температуры, увеличение резких перепадов в количестве осадков и интенсификация антропогенной активности – факторы, которые меняют биологическое равновесие в таежных экосистемах Сибири. Рассмотрение динамических процессов формирования почвенной эмиссии в мелких масштабах (сутки, сезон) позволит составить представление о основных драйверах и факторах, контролирующих данный процесс и учесть их при построении крупномасштабных экосистемных моделей. В ходе исследования установлено, что температура и влажность почвы контролируют суточный ход почвенной эмиссии, но в разные промежутки вегетационного сезона сила воздействия меняется. Для сезонной динамики характерен импульсный ответ на количество осадков в середине сезона, а в начале и в конце – сезонный ход описывает температурная зависимость.

Ключевые слова: почвенное дыхание, эмиссия CO₂, бореальные леса, температура, влажность почв, сезонная, суточная динамика.

Одним из ключевых вопросов, которые необходимо рассмотреть является будущая динамика большого количества С, которое в настоящее время хранится в толще почвы. Поток почвенного углерода очень чувствителен к изменениям температуры поверхности, и относительно небольшие изменения температуры могут существенно влиять на величину потока CO₂ из почвы. Потенциальное увеличение почвенной эмиссии CO₂, вызванное повышением температуры, может усилить скорости увеличения концентрации атмосферного CO₂ и глобальные изменения климата [1].

Ответ лесов бореальной зоны на глобальные изменения на сегодняшний день являются предметом научных дебатов [2,3], ввиду высокой чувствительности данного региона к внешним изменениям антропогенного или естественного характера. Оценка потенциала лесов бореальной зоны и понимание основных механизмов, контролирующей потоки CO₂ из почвы требует получения точной количественной оценки.

Измерения потоков CO₂ в Европе показывают, что бореальные леса являются более слабыми хранилищами для атмосферного CO₂ на единицу площади, чем леса более южных регионов [3], главным образом в результате высоких темпов дыхания почвы по отношению к фотосинтетической активности [4].

В масштабе сезона потоки CO₂ из почвы сильно коррелируют с изменениями температуры почвы, когда вода не является лимитирующим фактором [5]. Сильное ингибирование скорости потоков

наблюдалось при низком содержании воды в почве [6, 7], которая в основном объясняется уменьшением разложения вследствие микробной активности. Однако, как отражается повышенное содержание воды в почве остается предметом дебатов.

На сибирские леса приходится около 70 % общей площади евразийских бореальных лесов и являются важным регионом, контролирующим глобальный и региональный климат. В свою очередь, изменение климата вызывает реакцию сибирских экосистем, которая проявляется в перераспределении вещества и энергии между наземными экосистемами и атмосферой [8, 9]. Помимо этого, Сибирь является одним из фоновых регионов в Северном полушарии, где в определенные периоды года преобладают почти нетронутые условия среды [10].

Целью данной работы стало рассмотрение динамических изменений почвенной эмиссии CO₂ в течение сезона (июнь-сентябрь) и выявление некоторых закономерностей: (а) суточной и сезонной динамики; (б) влияние условий конкретного года на величину потока CO₂; (в) вклада гидротермических условий в формирование почвенной эмиссии для сосновых лесов средней тайги Центральной Сибири.

Район исследования находился в пределах Кеть-Сымской низменности на левобережье Енисея – часть Западно-Сибирской низменности с пологоувалистой заболоченной поверхностью. Краевая часть Кеть-Сымской низменности, примыкающая к Енисею, представляет собой замкнутое понижение, именуемое Тугуланской котловиной [11]. Важным

фактором для распределения растительных сообществ в данном районе является уровень грунтовых вод, определяющий степень увлажнения местообитаний. Почвенный покров представлен иллювиально-железистыми песчаными подзолами.

Климат отличается континентальностью. Согласно агроклиматическому районированию, это умеренно холодный район с достаточным увлажнением: сумма температур выше 10°C составляет 800–1200°, ГТК 1.2–1.6. Среднегодовая температура воздуха составляет -3.7 °C. Средняя минимальная температура воздуха -48 °C, средняя максимальная температура 31 °C. Абсолютная минимальная температура воздуха -54 °C, абсолютная максимальная температура 36 °C. Амплитуда колебания среднемесячных температур 41.9 °C. Выпавшие в течение года атмосферные осадки по сезонам распределяются неравномерно. Так, за апрель–октябрь, в результате развития циклонической деятельности, выпадает более 70 % от общего количества осадков. Максимум их приходится на июль–август. Среднегодовая относительная влажность воздуха 76 %. Сумма атмосферных осадков 590 мм за год [12].

За период инструментальных наблюдений (с 1936 года) в районе исследования среднегодовая температура воздуха увеличилась на 3.2 °C. Самым теплым был 2015 год, среднегодовая годовая температура была -0.5 °C. Отличительной чертой последнего десятилетия стала высокая вариабельность в количестве осадков, которая между отдельными годами могла достигать более 350 мм: например, сумма осадков за 2016 год составила 384.9 мм, а за 2017–742.9 мм.

Исследования проводились в сосновых биогеоценозах, которые занимают более 40 % территории. Сосняки лишайниковой группы типов леса произрастают преимущественно на повышенных хорошо дренированных участках рельефа – на малоплодородных песчаных гривах с глубоким залеганием грунтовых вод.

Измерения почвенного дыхания проводились в течение вегетационного сезона в период с июня по сентябрь включительно в течение пяти сезонов: 2012, 2013, 2015, 2016 и 2017 (со второй половины сезона) гг. Для измерения почвенной эмиссии CO₂ на каждой пробной площади были установлены пластиковые кольца диаметром 20 см – весной 2012 года, до начала измерительных работ. Глубина проникновения кольца в минеральный слой почвы зависела от мощности напочвенного покрова – она составляла не менее 10 см.

Измерения величины потока почвенного дыхания проводились с помощью автоматизированной системы по измерению потоков CO₂ с поверхности

почвы на основе инфракрасного газового анализатора LI-8100A (Li-cor Biogeosciences Inc., США). Помимо сезонных измерений, ежемесячно проводились измерения суточной динамики почвенного дыхания. Прибор устанавливался на измерительное кольцо, характеризующееся средними значениями дыхания для исследуемого типа напочвенного покрова, интервал между измерениями составлял 30 минут. Экспериментальные работы по изучению суточной динамики проводились во все сезоны измерений.

Прямые измерения температуры и влажности почв приводились непосредственно при каждом измерении потоков CO₂. Измерения температуры почв осуществлялось на трех глубинах – 5, 10 и 15 см от поверхности почвы. Данная глубина характеризуется максимальными запасами органического вещества и высокой биологической активностью. Измерения температуры почвы проводились с помощью почвенного температурного датчика Soil Temperature Probe Type E (Omega, США). Влажность почв измерялась на глубине 5 см от поверхности почвы, используя влагомер Theta Probe Model ML2 (Delta T Devices Ltd., Великобритания). Влагомер необходимо было установить на поверхность почвы, без напочвенного покрова, поэтому в месте проведения измерений напочвенный покров был элиминирован.

Изученные сезоны существенно различались по метеорологическим условиям вегетационного периода. При относительно близких значениях средних температур воздуха за весь сезон измерений (рис. 1), суммы осадков за сезон варьировали в широких пределах. Среднемноголетнее среднее количество осадков по метеостанции Бор за июнь–сентябрь для данной территории составляет 261 мм. Наибольший дефицит осадков (относительно среднемноголетнего значения) наблюдался в 2012 г. (54 %). В 2013 г. и 2016 г. относительно многолетнего среднего выпало 65 и 76 % осадков, соответственно. Повышенное количество осадков отмечено в 2015 г. (126 % от среднего многолетнего). Сезон измерений 2017 года можно охарактеризовать как наиболее близкий к средним значениям по количеству осадков (222 мм) и температуре воздуха (14.4 °C) (рис. 1).

Сезонный ход почвенной эмиссии имеет ряд характерных особенностей: максимальные потоки приходятся на конец июля – начала августа (рис. 2). Величина потоков определяется гидротермическими условиями участка и метеорологическими условиями сезона. В засушливые годы, пик потоков приходится на период с максимальным количеством осадков – начало и конец сезона. В переувлажненный сезон (2015 г.), напротив максимальные потоки отмечаются при снижении количества осадков. В сезоны со средним количеством осадков динамика

эмиссионных потоков совпадает с динамиком температуры почвы.

Максимальные потоки отмечены в вегетационный сезон 2015 года (рис. 12а): средняя величина почвенной эмиссии составила – 5.3 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, достигая 9.8 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в середине сезона. Средние потоки CO_2 за вегетационный сезон составляют 2.9 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, варьируя от 1 до 10 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Рис. 1. Метеорологические характеристики измерительного сезона (июнь–сентябрь) за 5-летний период наблюдений измерений в сравнении со среднегодовыми значениями по метеостанции Бор (1936–2017 гг. – по температуре воздуха и с 1966–2017 гг. – по количеству осадков). Данные по температуре воздуха приведены со стандартными ошибками.

Суточный ход почвенной эмиссии также контролировался условиями года, но общие закономерности сохранялись и между сезонами: пик эмиссии в начале сезона приходится на вечерние часы (после 20:00), в середине сезона на ночные часы, а в конце сезона – на более ранние вечерние часы (после 16:00). В течение сезона заметно меняется связь между почвенной эмиссией и температурой почвы (рис. 3). В начале сезона довольно четко прослеживается корреляция потоков с температурой, однако с 15 июня мы наблюдали ослабление данного взаимодействия и отличное поведение суточной динамики потоков CO_2 из почвы и температуры почвы. Температурный контроль процесса возобновляется только с 10 августа и продолжается до конца сезона. Изученный характер суточного хода почвенной эмиссии позволяет говорить о том, что температура почвы не основной лимитирующий фактор в условиях недостаточного увлажнения.

Изучение влияния температуры почвы было рассмотрено для разных по условиям увлажнения сезонов – засушливого (2012) и переувлажненного (2015). Существенным различием сезонов является величина почвенной эмиссии CO_2 (рис. 9): в 2012 году она варьировала в пределах до 3.5 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

в 2015 году флуктуации значений потоков и их величины были значительно выше и достигали 10 микромоляр $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в середине вегетационного сезона. Из этого следует, что недостаточное увлажнение ведет к ингибированию почвенной эмиссии CO_2 из почвы в течение вегетационного периода. Температура почв в засушливый год контролирует потоки почвенной эмиссии, что четко графически отражено, однако не на всем протяжении сезона, что было описано ранее. Переувлажненный год характеризуется сходными закономерностями, однако, в отличие от засушливого сезона – в середине вегетационного сезона (вторая половина июля – середина августа) можно проследить противоход в суточной динамике температуры почвы и почвенной эмиссии CO_2 после полудня (после 12:00). В засушливый сезон 2012, напротив, наблюдался лишь спад эмиссии в дневные и вечерние часы при росте и спаде температуры.

Рис. 2. Поток CO_2 с поверхности почвы, температура и влажность почв для 5 лет измерений в сосняке лишайниковом. Данные приведены со стандартным отклонением.

Рис. 3. Суточный ход почвенной эмиссии CO_2 и температуры почвы в сосняке лишайниковом для двух сезонов – 2012 и 2015.

В нашем районе исследования суточные вариации в значениях потоков значительно выше, даже в засушливый вегетационный сезон, что подтверждает высокую чувствительность лесов высоких широт к изменению внешних факторов.

Влажность почвы выступает одним из основным климатических факторов, оказывающих модифицирующее воздействие на поток CO_2 из почвы (рис. 4а). Зависимость почвенной эмиссии CO_2 от влажности в корреляционном эквиваленте, через квадратичную параболическую функцию слабая ($r=0.4$). Исходя из полученных зависимостей между влажностью

почвы и потоком CO_2 можно выявить оптимальные условия по влажности почв, при которых величины потоков максимальны. Для сосняка лишайникового она составляет $0.22 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ ($\text{SWS}=22\%$).

Была установлена достоверная экспоненциальная зависимость между температурой почв и потоком CO_2 для сосняка лишайникового из первой группы по влажности почв (рис. 4б). Скорости эмиссии в группе с влажностью $>0.22 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ на 35 % выше, чем в группе с влажностью менее 22 %. Для второй группы зависимость потока CO_2 от температуры низкая.

Рис. 4. Зависимость почвенной эмиссии CO_2 от (а) влажности почвы и (б) температуры почвы для двух групп по влажности почв (SWC – содержание воды в почве): SWC > 0.22 (относительная влажность > 22 %). SWC < 0.22 (относительная влажность < 22 %).

Выполненная работа позволила не только выявить ряд особенностей функционирования сосновых экосистем среднетаежной подзоны Центральной Сибири, но продемонстрировать текущие изменения в них в связи с высокой вариацией по условиям увлажнения территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-34-00736 «Влияние основных лимитирующих факторов (количество осадков и содержание азота в почве) на эмиссию CO_2 из почвы в бореальных лесах Центральной Сибири».

Список литературы

1. Fang C., Moncrieff J.B. 2001. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 155–165.
2. Lindroth A., Grelle A., Moren, A.-S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biol.* 4, 443–450.
3. Valentini R. et al. 2000. Respiration as the main determinant of the carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861–865.
4. Janssens I.A. et al. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Glob. Change Biol.* 7, 269–278.
5. 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.
6. Borken W., Xu Y.-J., Brumme R., Lamersdorf N. 1999. A climate change scenario for carbon dioxide and dissolved organic carbon fluxes from a temperate forest soil: drought and rewetting effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1848–1855.
7. Irvine J., Law B.E. 2002. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biol.* 8, 1183–1194.
8. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.R., Randerson J.T., Houghton R.A. 2007. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environ. Res. Lett.* 2, 1–9.
9. Lappalainen H.K. et al., 2016. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the northern Eurasian region. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14421–14461.
10. Chi X., Winderlich J., Mayer J.-C., Panov A.V., Heimann M., Birmili W., Heintzenberg J., Cheng Y., Andreae M.O. 2013. Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower to characterize polluted and pristine air in the Siberian taiga. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 12271–12298.
11. Глебов Ф.З. Взаимоотношения леса и болота в таежной зоне, 1988. Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 181 с.
12. Лесные экосистемы Енисейского меридиана (исследования по международной геосферно-биосферной программе), 2002. Плешиков Ф.И. (ред.). Новосибирск, Наука СО РАН, 356 с.

SOIL CO₂ EMISSION CHANGES IN THE TAIGA ECOSYSTEMS OF CENTRAL SIBERIA: FROM DAILY TO INTER-SEASONAL DYNAMICS

A.V. Makhnykina¹, D.A. Polosukhyna¹, N.N. Koshurnikova¹, A.S. Prokushkin²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk

²V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk

amakhnykina@sfu-kras.ru, dana_polo@mail.ru

natank1980@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru

Abstract. The study of soil emission of forests in the boreal zone is still subject to scientific discussions. Changes in temperature, an increase in sharp changes in the amount of precipitation and intensification of anthropogenic activity are factors that change the biological equilibrium in taiga ecosystems in Siberia. Consideration of the dynamic processes of formation of soil emissions on a small scale (day, season) will provide an idea of the main drivers and factors that control the process data and take them into account to construct large-scale ecosystem models. The study found that the soil temperature and moisture control the diurnal cycle of soil emission, but at different intervals of the growing season, the force of influence changes. Seasonal dynamics are characterized by a pulse response to the amount of precipitation in the middle of the season, and at the beginning and at the end – the seasonal course describes by the temperature dependence.

Keywords: soil respiration, CO₂ emission, boreal forests, temperature, soil moisture, seasonal, diurnal dynamics.

References

1. Fang C., Moncrieff J.B., 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 155–165. (In English)
2. Lindroth A., Grelle A., More'n A.-S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biol.* 4, 443–450. (In English)
3. Valentini R. et al., 2000. Respiration as the main determinant of the carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861–865. (In English)
4. Janssens I.A. et al., 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Glob. Change Biol.* 7, 269–278. (In English)
5. 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. (In English)
6. Borken W., Xu Y.-J., Brumme R., Lamersdorf N. 1999. A climate change scenario for carbon dioxide and dissolved organic carbon fluxes from a temperate forest soil: drought and rewetting effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1848–1855. (In English)
7. Irvine J., Law B.E. 2002. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biol.* 8, 1183–1194. (In English)
8. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.R., Randerson J.T., Houghton R.A. 2007. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environ. Res. Lett.* 2, 1–9. (In English)
9. Lappalainen H.K. et al., 2016. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the northern Eurasian region. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14421–14461. (In English)
10. Chi X., Winderlich J., Mayer J.-C., Panov A.V., Heimann M., Birmili W., Heintzenberg J., Cheng Y., Andreae M.O. 2013. Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower to characterize polluted and pristine air in the Siberian taiga. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 12271–12298. (In English)
11. Glebov F.Z. The relations of forest and marsh in the taiga zone, 1988. Novosibirsk, Nauka, SB RAS, 181 p. (in Russian)
12. Forest ecosystems of the Yenisei meridian (research on the international geosphere-biosphere program), 2002. Pleshikov F.I. (ed.). Novosibirsk, Nauka, SB RAS, 356 p. (in Russian)