

Потоки диоксида углерода в экосистеме мезоолиготрофного болота в переходный период осень – зима

О. А. МИХАЙЛОВ, С. В. ЗАГИРОВА, М. Н. МИГЛОВЕЦ, К. ВИЛЛЕ*

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: mikter@mail.ru*

**Институт почвоведения, Клима Кампус, Университет Гамбурга
20146, Германия, Гамбург, Алленде-Платц, 2
E-mail: christian.wille@zmaw.de*

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты изучения потоков диоксида углерода методом микровихревых пульсаций в экосистеме мезоолиготрофного болота европейского северо-востока России в переходный период осень – зима. Показано влияние температуры поверхности почвы на R_{eco} и интенсивности солнечной радиации – на NEE . С формированием устойчивого снежного покрова на болоте величина потока диоксида углерода снижалась, но полностью поток не прекращался.

Ключевые слова: мезоолиготрофное болото, диоксид углерода, метод микровихревых пульсаций.

Болотным экосистемам принадлежит важная роль в регуляции содержания диоксида углерода в атмосфере. Для изучения влияния климатических факторов на углеродный баланс болотных экосистем необходимо проведение количественных измерений. Одним из перспективных для оценки скорости и направления потоков CO_2 в экосистемах является метод микровихревых пульсаций (eddy covariance), который с 1990-х гг. применяется в исследованиях газообмена болотных экосистем в Финляндии [1, 2], Гренландии [3, 4], Канаде [5, 6]. В России его использовали для оценки стока/эмиссии CO_2 в болотных и тундровых сообществах европейской территории России [7], Центральной и Восточной Сибири [7–11] и Чукотки [12, 13].

Большинство этих работ проводили в теплый период года, когда наблюдается активное поглощение CO_2 растительным покровом болот. Исследований, посвященных функционированию болотных экосистем в осенне-зимний период, немного. Снижение поглощения и выделения CO_2 в осенний период некоторые авторы связывают с изменением состояния растительного покрова [5], уменьшением интенсивности ФАР [7] и снижением температуры почвы [14]. В связи с этим задача настоящей работы – оценка динамики потоков диоксида углерода с поверхности мезоолиготрофного болота средней тайги в переходный период осень – зима.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Измерения проводили с 30 сентября по 23 ноября 2010 г. на болоте Мэдла-Пэв-Нюр, расположенном в Сыктывдинском районе Республики Коми, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара. Площадь болота 2790 га, средняя мощность торфа 1,4 м, максимальная – 3,4 м. Болото расположено на второй надпойменной террасе, водоприемниками служат реки Пожег и Пычим. Торфяная залежь верхового, смешанного, переходного и низинного типа с зольностью от 23 до 35 % [15].

При описании растительности болота применяли оценку обилия видов растений по шкале Друде [16]. Видовые названия высших сосудистых растений приведены по работе [17], мхов – по [18, 19]. Участок болота, на котором проводили измерения, характеризуется разнообразием растительных сообществ, которые относятся к трем основным типам:

1) олиготрофные сосново-кустарничково-пушициево-сфагновые сообщества, где на кочках доминируют виды *Pinus sylvestris* L., *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Rubus chamaemorus* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum angustifolium* (C. Jens. ex Russ.), *Sphagnum fuscum* (Schimp.), *Polytrichum strictum* Brid., а в мочажинах – *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus palustris* Pers., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum angustifolium* (C. Jens. ex Russ.), *Sphagnum magellanicum* Brid.;

2) мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества с доминированием на кочках видов *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Ledum palustre* L., *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Eriophorum vaginatum* L., *Carex pauciflora* Lightf., *Sphagnum angustifolium* (C. Jens. ex Russ.), *Sphagnum fuscum* (Schimp.), *Sphagnum magellanicum* Brid., в мочажинах – *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Carex limosa* L., *Carex rostrata* Stokes, *Menyanthes trifoliata* L., *Scheuchzeria palustris* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum fallax* (Klinggr.), *Sphagnum magellanicum* Brid., *Warnstorfia exannulata* (B.S.G.), *Andromeda polifolia* L.;

3) мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь с преобладанием на кочках таких видов, как *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Oxycoccus palustris* Pers., *Equisetum fluviatile* L., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Sphagnum magellanicum* Brid., *Sphagnum fuscum* (Schimp.), в понижениях – *Oxycoccus palustris* Pers., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Eriophorum gracile* Koch, *Menyanthes trifoliata* L., *Pedicularis palustris* L., *Utricularia intermedia* Hayne, *Sphagnum fallax* (Klinggr.), *Sphagnum magellanicum* Brid., *Warnstorfia exannulata* (B. S. G.), мхи р. *Calliergon*.

В юго-западном направлении от измерительной системы находятся мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь и олиготрофное сосново-кустарничково-пушициево-сфагновое сообщество, а с северо-восточной стороны – олиготрофные и мезотрофные участки (рис. 1).

В работе использовали измерительную систему закрытого типа, которая включала стандартный комплект оборудования [20]. Направление и скорость ветра в трех проек-

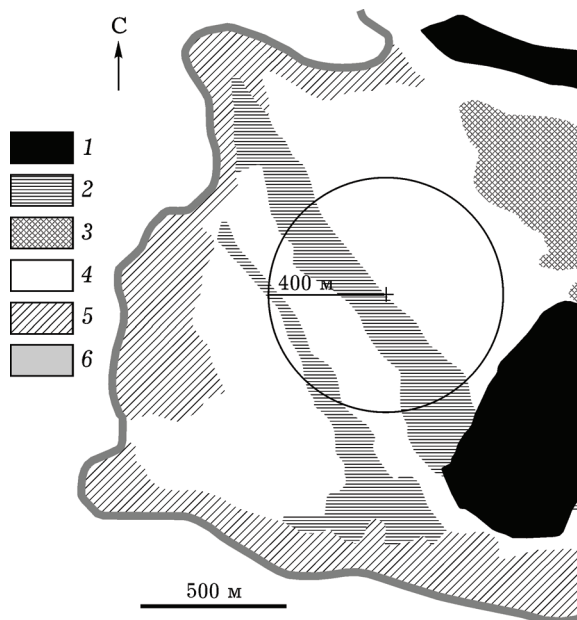


Рис. 1. Схема расположения измерительной системы на участке болота. 1 – минеральный лесной остров; 2 – мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь; 3 – олиготрофные сосново-кустарничково-пушициево-сфагновые сообщества; 4 – мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества; 5 – окраинная топь; 6 – граница болота

циях, а также акустическую температуру воздуха измеряли с помощью ультразвукового анемометра (Solent R3, Gill Instruments Ltd., Великобритания), установленного на высоте 4,23 м от поверхности болота (без учета снежного покрова), что позволяло покрывать пространство в радиусе около 400 м от места расположения системы.

Пробы воздуха отбирали из точки, располагающейся на 10 см ниже центра анемометра, и при помощи насоса по полиэтиленовой трубке перекачивали в камеру газоанализатора. Концентрацию диоксида углерода измеряли инфракрасным газоанализатором (Li-7000, Li-Cor Inc., США). Параметры микроклимата (температуру и влажность воздуха, интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР), падающей и отраженной солнечной радиации) регистрировали автоматической метеостанцией (Campbell Scientific, США) с частотой 20 Гц. Среднюю величину NEE – чистого экосистемного обмена диоксида углерода, представляющего разницу между величинами валовой первичной продукции экосистемы (P_{gross}) и суммарного дыхания ее компонентов (R_{eco}) – рассчитывали за 30-минутные временные интервалы с использованием программного обеспечения EdiRe (Robert Clement, Университет Эдинбурга, Великобритания). После программного анализа полученных величин NEE выявляли ошибки измерений, которые могли возникнуть по нескольким причинам: 1) из-за неустойчивой работы системы, калибровки, замены фильтров и деталей; 2) недостаточного перемешивания воздуха при низкой турбулентности ночью или при отсутствии ветра; 3) непостоянства факторов среды [21]. Не отвечающие параметрам проверки значения потоков CO_2 не учитывали при дальнейшей обработке данных. Образовавшиеся таким образом пробелы в ряду измерений, которые составили около 12 % от всей выборки, были затем заполнены с использованием on-line программы (<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/>). С помощью этой же программы разделяли результирующий поток диоксида углерода (NEE) на дыхание экосистемы (R_{eco}) и гросс-фотосинтез (P_{gross}). На рисунках отрицательные значения этих величин соответствуют стоку, а положительные – эмиссии CO_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период проведения исследований отмечена нестабильность температуры в течение суток: снижение температуры поверхности почвы до -5 °С сменялось резким потеплением до $+10$ °С. Первый снег выпал в середине октября. Устойчивый снежный покров на болоте начал формироваться в первой декаде ноября, однако до конца периода измерений его глубина не превышала 3–5 см. Максимальная интенсивность поступающей к поверхности болотной растительности ФАР в первой половине октября достигала 730 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, затем постепенно снижалась и в конце октября не превышала 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, что связано с изменением положения высоты Солнца над горизонтом и повышением облачности. В период проведения измерений в 80 % случаев отмечали ветер юго-западного и юго-восточного направлений (рис. 2).

В начале наблюдений в первой декаде октября сток диоксида углерода из атмосферы в болото (NEE) составил -107 – -109 $\mu\text{kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (рис. 3). Со второй декады октября по ноябрь наблюдали эмиссию диоксида углерода с поверхности болота в атмосферу. Изменение величины и направления потока CO_2 в системе “болото – атмосфера” осенью может быть связано с завершением вегетации растений. Так, в Канаде превышение эмиссии над стоком в болотных сообществах начиналось с середины августа, через 15–20 дней после появления первых признаков увядания сосудистых растений [5]. В центре европейской территории России и Центральной Сибири переход стока на эмиссию CO_2 на болоте наблюдали в начале – середине сентября [7], а в тундровых экосистемах Чукотского п-ова он зафиксирован в конце августа – начале сентября [12]. В условиях средней тайги европейского северо-востока России вегетация сосудистых растений завершается во II–III декадах сентября [22], а переключение стока на эмиссию в болотной экосистеме зафиксировано нами в первой декаде октября. В октябре – ноябре динамика NEE сопряжена с изменением температуры поверхности почвы. Даже кратковременные понижения температуры приводили к снижению величины потока CO_2 . В кон-

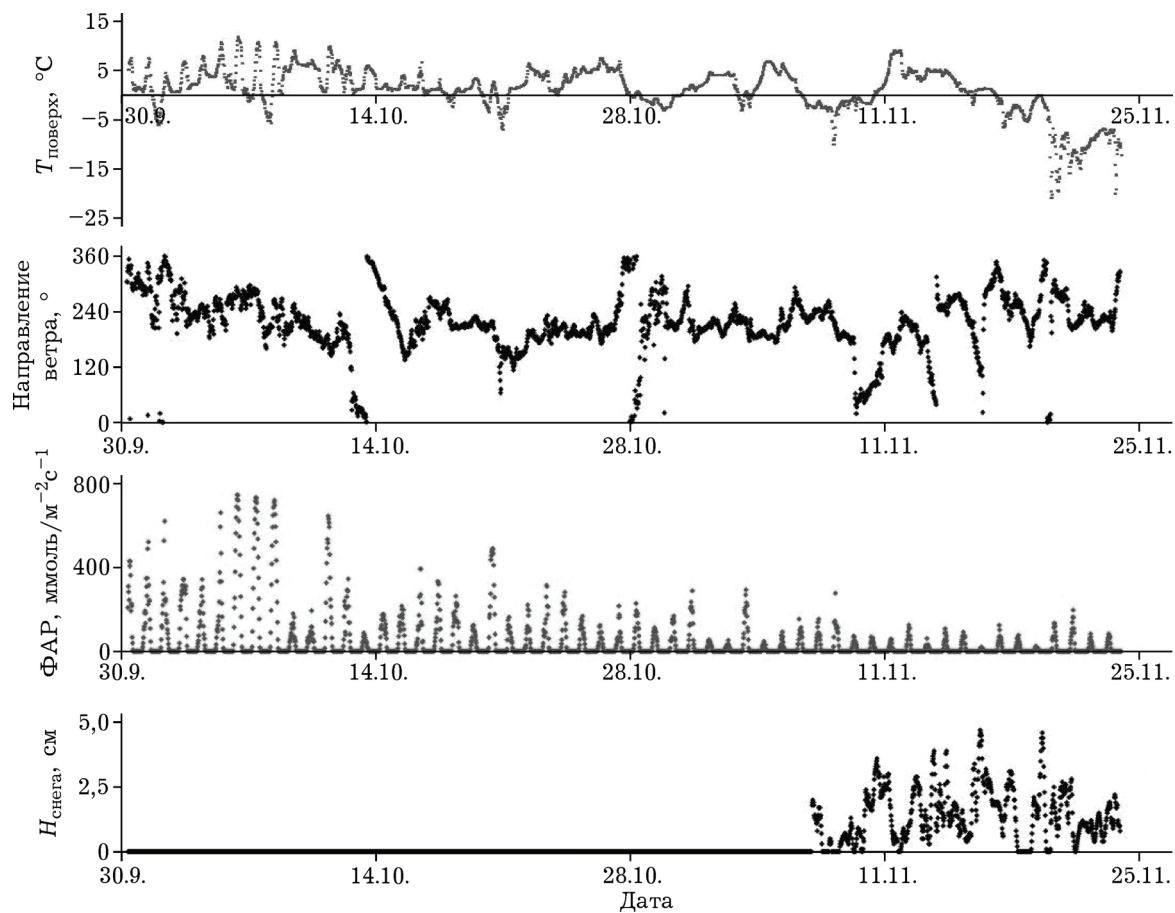


Рис. 2. Динамика микрометеорологических параметров в экосистеме мезоолиготрофного болота с 30 сентября по 23 ноября 2010 г.

це периода измерений в ноябре средние значения NEE не превышали $22,66 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В целом полученная нами средняя величина NEE за весь период измерений составила $16,75 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что близко к результатам, полученным в болотных экосистемах других регионов. Так, на верховых болотах центра европейской части России и Центральной Сибири средние значения NEE в осенний период составили $\sim 20,38$ и $\sim 10,19 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно [7]. На верховом болоте Канады осенью NEE составил $\sim 12,73 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [6]. Аапа-болото Финляндии осенью характеризовалось величиной NEE $-35 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в дневное и $40 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в ночное время [23]. На верховом болоте США в осенний период среднесуточные значения NEE достигали $\sim 33,56 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [24], что значительно выше полученных нами значений.

При анализе динамики gross-фотосинтеза и дыхания экосистемы, составляющих NEE ,

выявлено, что максимальная величина P_{gross} в сентябре составляла $-146,19 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а с выпадением снега в начале ноября уменьшилась до $-30 \text{ мкг м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Максимальные значения R_{eco} за этот период также снизились примерно в 4 раза (см. рис. 3). Кратковременное снижение величины фотосинтеза и дыхания в экосистеме болота наблюдали при отрицательных значениях среднесуточных температур в некоторые дни октября, до формирования сплошного снежного покрова. Потоки CO_2 с увеличением толщины снежного покрова не прекращались, что согласуется с данными других исследований [7]. Авторы указывают, что в этот период функцию фотоассимиляции в экосистеме болота выполняют в основном сфагновые мхи, которые имеют более широкий температурный и световой оптимум фотосинтеза [6, 25]. На это указывает полученная нами относительно высокая корреляционная зависимость NEE от интенсивности ФАР (рис. 4).

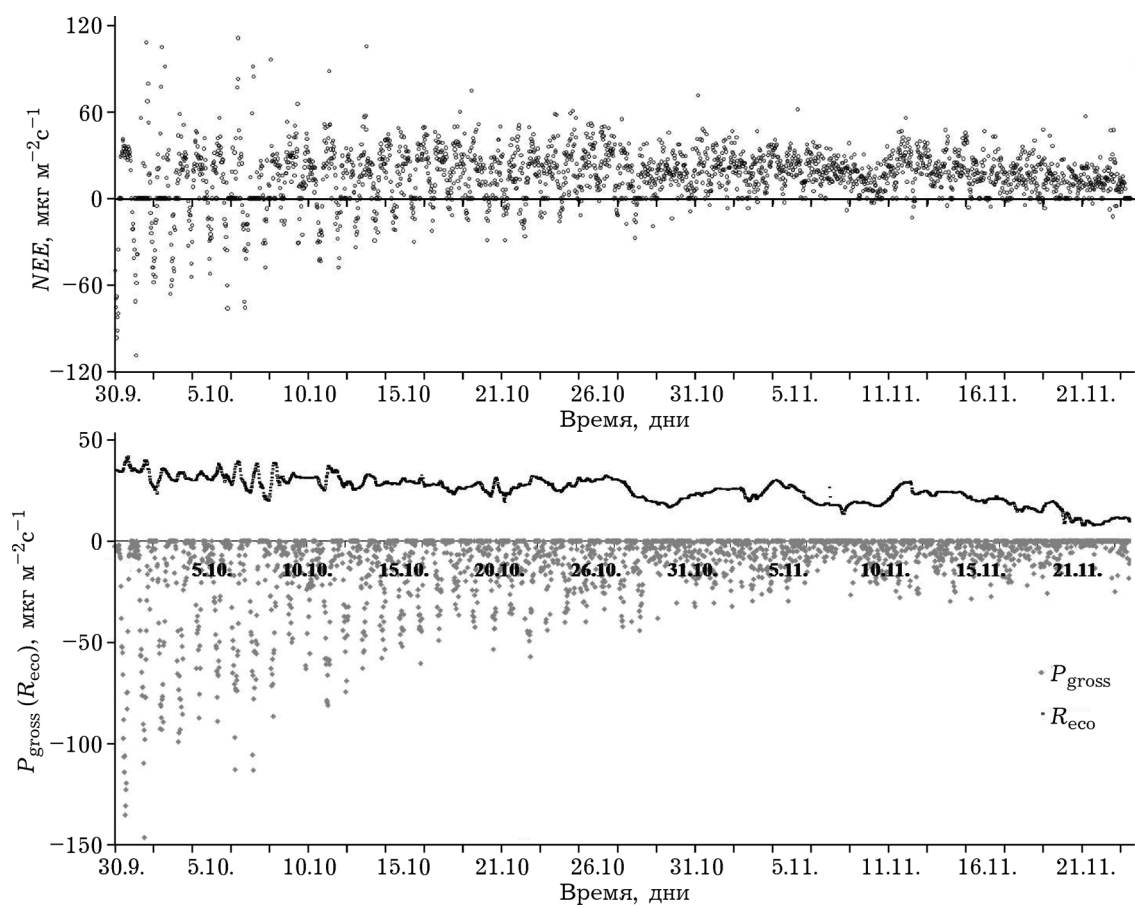


Рис. 3. Динамика потоков диоксида углерода в экосистеме мезоолиготрофного болота с 30 сентября по 23 ноября 2010 г.

Отрицательные значения соответствуют поглощению, а положительные – выделению CO_2

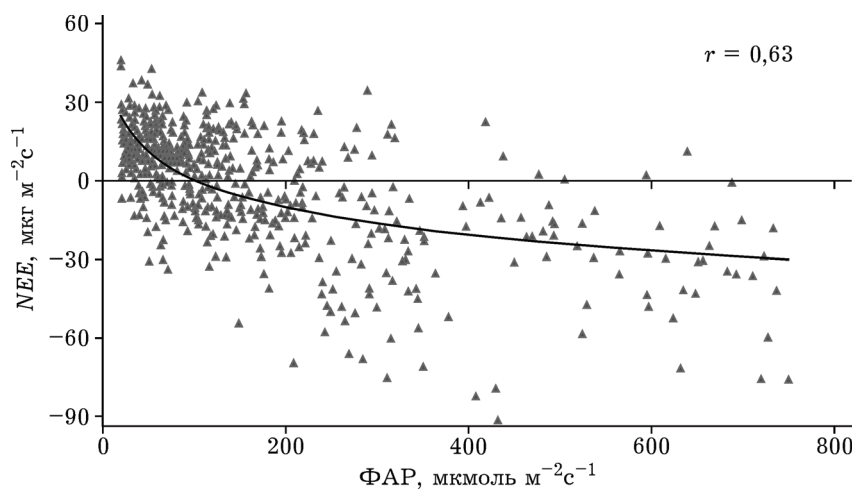


Рис. 4. Зависимость NEE от интенсивности ФАР (30 сентября – 23 ноября)

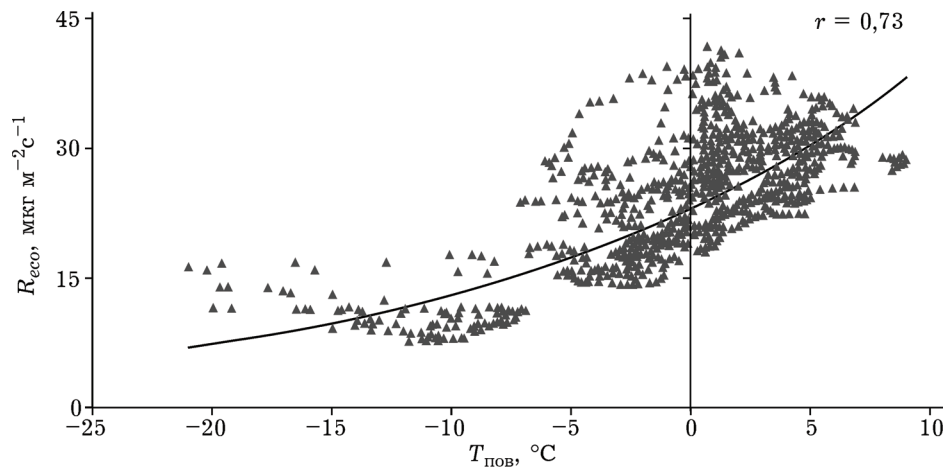


Рис. 5. Зависимость R_{eco} от температуры поверхности почвы (30 сентября – 23 ноября)

Значительное влияние на направление и интенсивность потоков диоксида углерода в вегетационный период оказывает температура почвы [10]. Уменьшение температуры приводит к резкому снижению интенсивности гетеротрофного дыхания почвы, которое вносит значительный вклад в суммарное дыхание экосистемы [26]. Согласно нашим наблюдениям, снижение экосистемного дыхания также сопряжено со снижением температуры поверхности почвы, и зависимость R_{eco} от температуры хорошо описывается экспоненциальной функцией (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода микровихревых пульсаций позволило установить динамику потоков диоксида углерода в экосистеме болота в переходный период осень – зима. Изменение направления потока диоксида углерода со стока на эмиссию в условиях средней тайги европейского северо-востока России происходило в первой декаде октября, через 2-3 нед. после завершения вегетации болотных растений. В осенний период сохранялась зависимость NEE от ФАР и R_{eco} от температуры поверхности почвы. Формирование снежного покрова не приводило к полному прекращению дыхания и gross-фотосинтеза, что может быть связано с сохранением процессов газообмена у сфагновых мхов в этот период.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ПРООН/ГЭФ № 00059042.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.-P. Seasonal CO₂ balances of a subarctic mire // J. of geophysical research. 2001. Vol. 106, N D2. P. 1623–1637.
2. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.-P. Annual CO₂ balance of a subarctic fen in northern Europe: Importance of the wintertime efflux // Ibid. 2002. Vol. 107, N D21. P. 4607–4618.
3. Soegaard H., Nordstroem C. Carbon dioxide exchange in a high-arctic fen estimated by eddy covariance measurements and modeling // Global change biology. 1999. N 5. P. 547–562.
4. Soegaard H., Nordstroem C., Friborg T., Hansen B. U., Christensen T. R., Bay C. Trace gas exchange in a high-arctic valley 3. Integrating and scaling CO₂ fluxes from canopy to landscape using flux data, footprint modeling, and remote sensing // Global biogeochemical cycles. 2000. Vol. 14, N 3. P. 725–744.
5. Lafleur P. M., McCaughey J. H., Joiner D. W., Bartlett P. A. Seasonal trends in energy, water, and carbon dioxide fluxes at a northern boreal wetland // J. of geophysical research. 1997. Vol. 102. P. 29009–29020.
6. Lafleur P. M., Roulet N. T., Admiral S. W. Annual cycle of CO₂ exchange at a bog peatland // Ibid. 2001. Vol. 106. P. 3071–3081.
7. Arneth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O. B., Lloyd J., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // Tellus. 2002. N 54B. P. 514–530.
8. Schulze E.-D., Prokuschkin A., Arneth A., Knorre N., Vaganov E. A. Net ecosystem productivity and peat accumulation in a Siberian Aapa mire // Ibid. 2002. N 54 B. P. 531–536.
9. Arheth A., Lloyd J., Shibistova O., Sogachev A., Kolle O. Spring in the boreal environment: observations on pre- and post-melt energy and CO₂ fluxes in two central Siberian ecosystems // Boreal environment research. 2006. N 11. P. 311–328.

10. Kutzbach L., Wille C., Pfeiffer E.-M. The exchange of carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River Delta, Northern Siberia // *Biogeosciences*. 2007. N 4. P. 869–890.
11. van der Molen M. K., van Huissteden J., Parmentier F. J. W., Petrescu A. M. R., Dolman A. J., Maximov T. C., Kononov A. V., Karsanaev S. V., Suzdalov D. A. The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia // *Ibid.* 2007. N 4. P. 985–1003.
12. Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И., Лопес де Гереню В. О. Микрометеорологическая оценка биогенных потоков диоксида углерода в типичных тундрах Восточной Чукотки // *Почвоведение*. 2005. № 7. С. 859–863.
13. Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Ivaschenko A. I., Oechel W. C., Hastings S. J. CO₂ flux measurements in Russian Far East tundra using eddy covariance and closed chamber techniques // *Tellus*. 2003. N 55B. P. 879–892.
14. Lloyd J., Taylor J. F. On the temperature dependence of soil respiration // *Functional ecology*. 1994. Vol. 8, N 3. P. 315–323.
15. Торфяные ресурсы Республики Коми. Сыктывкар: Полиграф-сервис, 2000. 613 с.
16. Шенников А. П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 447 с.
17. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
18. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России. Т. 1. Sphagnaceae – Hedwigiaceae. М.: КМК, 2003. С. 1–608.
19. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России. Т. 2. Fontinalaceae – Amblystegiaceae. М.: КМК, 2003. С. 609–944.
20. Moncrieff J. B., Massheder J. M., de Bruin H., Elbers J., Friborg T., Heusinkveld B., Kabat P., Scott S., Soegaard H., Verhoef A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide // *J. of hydrology*. 1997. N 188–189. P. 589–611.
21. Foken Th., Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements // *Agricultural and forest meteorology*. 1996. N 78. P. 83–105.
22. Леса Республики Коми / под ред. Г. М. Козубова, А. И. Таскаева. М.: Дизайн. Информация. Картография, 1999. 332 с.
23. Aurela M., Tuovinen J.-P., Laurila T. Carbon dioxide exchange in a subarctic peatland ecosystem in northern Europe measured by the eddy covariance technique // *J. of geophysical research*. 1998. Vol. 103. P. 11289–11301.
24. Shurpali N. J., Verma S. B., Kim J., Arkebauer T. J. Carbon dioxide exchange in a peatland ecosystem // *Ibid.* 1995. Vol. 100, N D7. P. 14319–14326.
25. Попов Э. Г., Таланов А. В., Курец В. К. Эколого-физиологические характеристики ряда автохтонных видов древесных растений и мхов Карелии // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2006. Вып. 10. С. 105–110.
26. Raich J. W., Schlesinger W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus*. 1992. N 44B. P. 81–99.

Carbon Dioxide Fluxes in the Ecosystem of Meso-Oligotrophic Peatland during the Period of Transition from Autumn to Winter

O. A. MIKHAILOV, S. V. ZAGIROVA, M. N. MIGLOVETS, C. WILLE*

*Institute of Biology, Komi Scientific Center UrB RAS
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: mikter@mail.ru*

**Soil Science Institute, Klima Campus, University of Hamburg
20146, Germany, Hamburg, Alende-Platz, 2
E-mail: christian.wille@zmaw.de*

Results of the investigation of carbon dioxide fluxes by means of eddy covariance in the ecosystem of meso-oligotrophic peatland of the European North-East of Russia during the transition from autumn to winter are presented. The effect of temperature at soil surface on R_{eco} and the effect of solar radiation intensity on NEE are revealed. The value of carbon dioxide flux decreased with the formation of a stable snow cover on peatland but did not disappear.

Key words: meso-oligotrophic peatland, carbon dioxide, eddy covariance method.