

УДК: 551.51

## РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКОВ CO<sub>2</sub> НА ВЕРХОВОМ БОЛОТЕ

© 2009 Ю.А. Курбатова<sup>1</sup>, Н.В. Шалухина<sup>1</sup>, А.В. Варлагин<sup>1</sup>, Ч. Ли<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва; e-mail:kurbatova.j@gmail.com

<sup>2</sup>Институт исследования Земли, океанов и космоса университета Нью Хемпшира, США, Нью Хемпшир

Модель денитрификации – декомпозиции (Forest-DNDC) была применена для оценки потоков CO<sub>2</sub> на верховом болоте южной тайги в европейской части РФ (Тверская обл.). Исследование было проведено в два этапа. На первом этапе результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными за потоками CO<sub>2</sub>, которые были получены с помощью техники пульсационных наблюдений. На втором этапе были выполнены прогнозные оценки потоков CO<sub>2</sub> между экосистемами и атмосферой при возможных изменениях уровня грунтовых вод и температуры воздуха. Установлено, что рост температуры воздуха и увеличение глубины уровня грунтовых вод может привести к существенному росту потоков CO<sub>2</sub> в атмосферу в экосистемах южной тайги Европейской части РФ.

Ключевые слова: потоки CO<sub>2</sub>, южная тайга, верховое болото, модель Forest-DNDC.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в контексте проблемы глобального изменения климата исследования роли природных экосистем в формировании баланса парниковых газов сохраняют особую актуальность. Болота и заболоченные земли с наличием торфа являются важными элементами ландшафта, способными к аккумуляции углерода в геологическом масштабе времени. В северном полушарии в зоне бореальных лесов Евразии и Северной Америки площадь торфяных болот составляет около  $3.5 \times 10^6$  км<sup>2</sup> [16]. По различным оценкам запасы углерода в заболоченных землях бореального пояса равны  $114-882 \times 10^9$  т С [5, 12, 17]. Россия обладает одним из самых больших в мире запасов торфяных болот. Болота и заболоченные земли занимают не менее 20% территории и представляют около 2/5 площади всех торфяных болот мира [1]. Запасы углерода в болотах РФ оцениваются от  $113,5 \times 10^9$  т [20] до  $200 \times 10^9$  т [8], что составляет от 20% до 50% запасов углерода в торфяных болотах в целом. Несмотря на то, что болота и заболоченные земли занимают около 3% земной поверхности, они, как правило, не входят в глобальные климатические модели и не рассматриваются в климатических сценариях. Исследования в основном сосредоточены на влиянии глобальных климатических изменений на лесные и морских экосистемы [11]. Болота и заболоченные земли традиционно оцениваются как источник водяного пара для атмосферы и как экосистемы, depo-

нирующие углерод. Однако экспериментальные исследования, выполненные в последнее время, подтвердили значительную изменчивость неттопотока углерода между болотными экосистемами и атмосферой, которая определяется комплексом факторов [4, 6]. Математические модели, позволяющие рассчитывать основные составляющие углеродного баланса на основе связей углеродного цикла с температурой, влажностью, уровнем грунтовых вод, интенсивностью солнечной радиации и характеристиками почвенного профиля являются важным инструментом экологических исследований, позволяющим расширить представления о механизме формирования баланса углерода и оценить влияние климатических изменений на потоки CO<sub>2</sub>.

Основной целью данной работы стало исследование влияния температурных условий и глубины залегания грунтовых вод на динамику потоков углерода между поверхностью болотной экосистемы и атмосферой на основе анализа результатов математического моделирования.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

*Математическое моделирование.* Модель Forest-DNDC (денитрификации - декомпозиции), используемая в данном исследовании, является математической моделью, описывающей потоки воды, углерода, азота и метана в лесных и болотных экосистемах [19]. Модель оценивает гидрологические и биохимические процессы в экосистеме, что позволяет описывать как анаэ-

робные, так и аэробные процессы. Модель Forest - DNDC состоит из двух основных блоков. Первый блок включает три подмодели, описывающие: температурно-влажностный режим почвы, растительный покров, процессы декомпозиции почвенного углерода. Подмодели оценивают зависимости между климатическими факторами, структурой почвы, растительным покровом, антропогенной активностью и характеристиками почвенного профиля. Второй блок состоит из подмоделей: нитрификации, денитрификации и ферментации и описывает трансформацию углерода и азота под воздействием факторов окружающей среды. Результаты моделирования позволяют оценивать суточные и годовые потоки  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ . Расчетные значения нетто-экосистемного обмена  $\text{CO}_2$  (NEE) равны разнице между нетто-первичной продукцией (GPP) и дыханием автотрофов (Ra) и гетеротрофов (Rh). Динамика почвенного увлажнения оценивается на основе данных о суточных суммах осадков и испарения, структуры почвы, потерь влаги из-за процессов вымывания. Для моделирования потоков газов в болотных экосистемах необходимы ежедневные данные об уровне грунтовых вод (WT) с целью определения степени увлажнения торфяной залежи. В качестве данных о WT могут быть использованы результаты полевых наблюдений, данные эмпирических зависимостей, результаты расчетов гидрологических моделей, описывающих динамику воды в болотных экосистемах. Модель Forest-DNDC была протестирована на основе данных наблюдений за потоками  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах РФ и Европы [9, 10, 14, 15]. В данном исследовании модель Forest-DNDC была использована с целью оценки потоков  $\text{CO}_2$  между поверхностью верхового болота и атмосферой при возможных климатических изменениях.

Исследование было выполнено в два этапа. На первом этапе результаты численного моделирования были сопоставлены с экспериментальными значениями потоков  $\text{CO}_2$ , которые были получены на верховом болоте. В качестве гидрометеорологических данных (минимальная и минимальная температура воздуха, суточные суммы осадков, потоки солнечной радиации) были использованы наблюдения ближайшей к болотному массиву метеорологической станции, расположенной в 5 км от болотного массива данные измерительного комплекса, установленного на верховом болоте. Для расчета были использованы следующие характеристики почвенной залежи: глубина торфяного горизонта – 1,5 м; плотность торфа – 0,1 г см<sup>3</sup>; пористость - 0,8; общее содержание углерода в торфяной залежи мощностью 1,5 м - 313 300 кг С га<sup>-1</sup>. При расчетах растительный покров был охарактеризован как моховой (3000 кг С га<sup>-1</sup>) и состоящий из сосудистых растений (3000 кг С га<sup>-1</sup>). Основные физиологические параметры растительного покрова приведены в таблице 1. После уточнения параметров модели, на втором этапе нашего исследования Forest - DNDC была использована с целью оценки влияния роста температуры воздуха и изменения уровня грунтовых вод на NEE верхового болота. Пять альтернативных сценариев изменения температуры воздуха и уровня грунтовых вод были использованы при оценке NEE. Потоки оценивались при последовательном росте температуры воздуха на 2,4°C и/или увеличении глубины залегания грунтовых вод на 10 или 20 см. Выбор данных сценариев был обусловлен существующими прогнозами роста летних температур воздуха и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, в том числе засух, в данном регионе при прогнозируемых климатических изменениях [13].

**Таблица 1.** Параметры моховой и сосудистой растительности верхового болота, используемы в модели Forest-DNDC

Вид	Максимальный фотосинтез, мкмоль м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	Минимальная температура фотосинтеза, °С	Максимальная температура фотосинтеза, °С	Оптимальная температура фотосинтеза, °С	Макс. LAI	Глубина корней, м
Мхи	10	5	35	20	0,1	0,5
Сосудистые растения	10.3	5	30	20	0,28	0,3

*Объект исследования и экспериментальные наблюдения.* В качестве объекта исследования было выбрано верховое болото, расположенное на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного запо-

ведника (ЦЛЗ) в Тверской обл. (56°N, 33°E). Территория ЦЛЗ находится в зоне умеренно-континентального климата, со среднегодовой температурой воздуха 3,8°C и годовой суммой осадков 731 мм. Продолжительность безморозного

периода в среднем составляет 111 дней [2]. Согласно классификации, принятой в Гидрометеослужбе РФ [3], выбранный для исследования болотный массив относится к выпуклым талым олиготрофным комплексным грядово-мочажинным болотам с сезонным промерзанием. Площадь болотного массива 617 га. Состав болотных формаций характеризуется значительной неоднородностью. Наибольшее распространение имеет сфагново-пушицевый тип микроландшафта.

Исследования потоков двуокиси углерода между поверхностью болотного массива и атмосферой были проведены в рамках проекта ЕС «Eurosiberian Carbonflux». В целом измерения, обработка и анализ данных были выполнены с использованием унифицированных подходов, принятых на европейской сети станций долговременного мониторинга потоков CO<sub>2</sub> [7]. Экспериментальные данные о NEE были получены как ковариация между пульсациями концентрации CO<sub>2</sub> и вертикальной составляющей скорости ветра на высоте 6 м над поверхностью болота. Для измерения пульсаций температуры и составляющих скорости ветра использовался ультразвуковой анемометр (Solent R3, Gill Instruments, Lunington, UK). Наблюдения за пульсациями CO<sub>2</sub> были выполнены с помощью инфракрасного газоанализатора (IRGA, Li-Cor 6262, Lincoln, USA). Потоки CO<sub>2</sub> в процессе обработки и анализа усреднялись за 30 минут. Для оценки пространственного осреднения была использована модель Shuepp [18]. Согласно расчетам по этой модели, при установке датчиков на высоте 6 м в среднем за

сутки 90% значений измеряемого потока соответствует взвешенному среднему значению вдоль траектории переноса с линейными размерами 1100-1200 м. Соответственно, анализируемые данные в целом характеризуют потоки CO<sub>2</sub> на экосистемном уровне осреднения. Дополнительно измерялись температура и влажность воздуха, температура почвы на глубинах 5, 15, 50 и 100 см, давление, основные составляющие радиационного баланса. Подробности измерений описаны в работе [6]. Наблюдения за потоками проводились в течение трех вегетационных сезонов 1998-2000 гг. В данной работе анализировались данные только 1999 г., что было обусловлено двумя основными причинами: (1) 1999 г характеризовался наиболее длительным и полным рядом наблюдений; (2) в 1999 г болотный массив функционировал как источник CO<sub>2</sub> для атмосферы (т.е. кумулятивный поток экосистемного дыхания был выше общей первичной продукции), что может служить прототипом функционирования верхового болота в условиях роста температуры воздуха и опускания уровня грунтовых вод, а также во время длительных засух.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной характеристикой модели, по которой проводилось сопоставление экспериментальных и расчетных величин являлся нетто-экосистемный обмен CO<sub>2</sub> (C). Именно эта характеристика носит комплексный характер, т.к. именно на NEE влияет вся совокупность параметров, вхо-

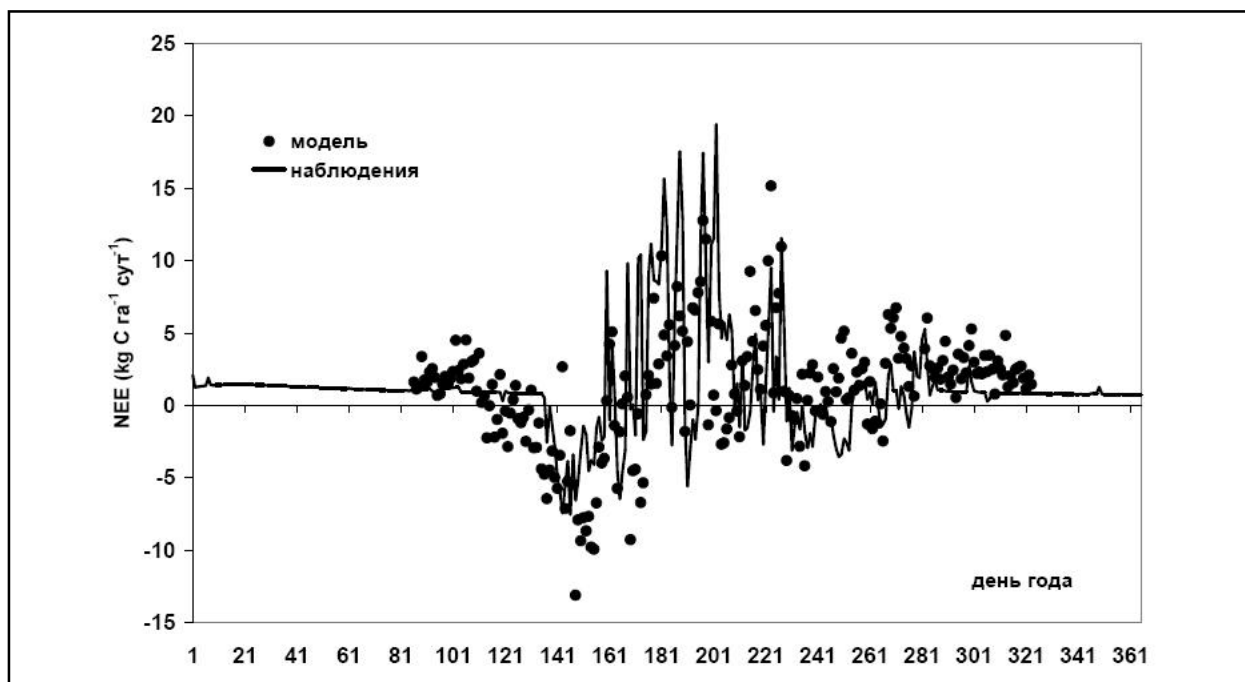


Рис. Экспериментальные и расчетные значения NEE для 1999 г.

дящих в модель. NEE (или за более длительные периоды времени – нетто-экосистемная продукция (NEP) является важнейшей характеристикой экосистемы, т.к. на основании этой величины можно определить характер функционирования экосистемы (доминируют ли в ней процессы синтеза или деструкции). На рисунке приведено сопоставление результатов измерения и расчетов суточных сумм NEE для 1999 г.

Полученные результаты подтвердили, что модель Forest-DNDC адекватно описывает потоки CO<sub>2</sub> на верховом болоте. Результаты моделирования позволяют лучше интерпретировать полученные экспериментальные данные и объяснять механизмы формирования углеродного баланса болотной экосистемы. Выполненные прогнозные оценки показали, что в условиях изменения климата, которые могут сопровождаться ростом температуры воздуха и увеличением глубины уровня грунтовых вод верховые болота могут стать значительным источником CO<sub>2</sub> для атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сирин А.А., Минаева Т.Ю.* Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации. М.: Геос. 2001. 190 с.
2. *Минаева Т.Ю., Шапошников Е.С.* Характеристика региона и природные условия территории заповедника // Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия. Спб. 1999. С. 296-299.
3. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 295 с.
4. *Alm J., Talanov A., Saarnio S et al.* Reconstruction of the carbon balance for mire sites in a boreal oligotrophic pine fen // Finland – Oecologia. 1997. V. 110. P. 423 - 431.
5. *Armentano T., Menges E.* Patterns of change in the carbon balance of organic soil wetlands of the temperate zone // J. Ecol. 1986. V. 74. P. 755-774.
6. *Arnth A., Kurbatova J., Kolle O. et al.* Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO<sub>2</sub> fluxes // Tellus. 2002. V. 54B. P. 514-530.
7. *Aubinet M., Grelle A., Ibrom A. et al.* Estimates of annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology // Adv. Ecol. Res. 2000. V. 30. P. 113-175.
8. *Botch M.S., Kobak K., Vinson T.S.* Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochem Cycles. 1995. V. 9. P. 37-46.
9. *Butterbach-Bahl K., Kesik M., Miehle P., Papen H., Li C.* Quantifying the regional source strength of N trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based models // Plant and Soil. 2004. V. 260. P. 311 - 329.
10. *Cui J., Li C., Sun G., Trettin C.* Linkage of MIKE SHE to Wetland-DNDC for carbon budgeting and anaerobic biogeochemistry simulation // Biogeochemistry. 2005 V. 72. P. 147-167.
11. *Fan S., Gloor M., Mahlman J. et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and model // Science. 1998. V. 282. P. 442 – 447.
12. *Gorham E.* Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climate warming // Ecol. Appl. 1991. V. 1. P. 182-195.
13. *IPCC 2007 Climate Change: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press: 2007. 960 p.
14. *Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N.* Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // Biogeosciences. 2008. V. 5. P. 969-980.
15. *Miehle P., Livesley S. J., Feikema P. M., Li C., Arndt S. K.* Assessing productivity and carbon sequestration capacity of Eucalyptus globulus plantations using the process model Forest-DNDC: Calibration and validation // Ecological Modelling. 2006. V. 192. P. 83-94.
16. *Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.* Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Paleoclimate // Wetlands and Natural Resource Management. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Ecological studies. 2006. V. 190. P. 315-341.
17. *Post W., Emanuel W., Zinker P.* Soil carbon pools and word life zones // Nature. 1982. V. 298. P. 156-159.
18. *Shuepp P.H., Leclers M.Y., Pherson J.I., Desjardings R.L.* Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of diffusion equation // Bound. Layer Meteorol. 1990. V. 50. P. 335-374.
19. URL: <http://www.dnnc.sr.unh.edu>
20. *Vompersky S., Tsyganova O., Valyeva N.* Peat covered wetlands of Russia and carbon pool of their peat // Peatland use – present, past and future / Proc. Intern. Peat. Congr. 1996. V. 10. P. 381 – 390.

## MODELING IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CARBON DIOXIDE FLUXES FROM A OMBROTROPHIC BOG

© 2009 Ju.A. Kurbatova <sup>1</sup>, N.V. Shalukhina <sup>1</sup>, A.V. Varlagin <sup>1</sup>, C. Li <sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS, Moscow, Russia;  
e-mail:kurbatova.j@gmail.com

<sup>2</sup>Institute for the Study of Earth, Oceans and Space University of New Hampshire, USA;

A process-based model (Forest-DNDC) was applied for modeling impacts of climate change on carbon dioxide fluxes from a peat bog in European Russia. At first, Forest-DNDC was tested against carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fluxes measured by the eddy covariance method on an ombrotrophic bog in region of southern taiga (56°N 33°E). The results from the tests showed that Forest-DNDC was capable of quantifying CO<sub>2</sub> fluxes from the bog ecosystem. The validated model was then utilized to estimate how climate changes could affect the C dynamics in the bogs under several assumed temperature-hydrology scenarios. The modeling study reported in this paper implicated that the bog ecosystems could become a significant source of atmospheric CO<sub>2</sub> under certain temperature and water table changes in future.

Keywords: *CO<sub>2</sub> fluxes, Forest-DNDC model, bog ecosystem, southern taiga.*