

УДК 631.433.3

МИКРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БИОГЕННЫХ
ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ТИПИЧНЫХ ТУНДРАХ
ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ© 2005 г. Д. Г. Замолодчиков^{1,2}, Д. В. Карелин¹, А. И. Иващенко¹,
В. О. Лопес де Гереню³¹Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва³Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино

Поступила в редакцию 12.03.2004 г.

Приведены результаты микрометеорологических измерений потока углекислого газа в типичных тундрах Чукотского п-ова для теплых сезонов 2000–2002 гг. Использованы приемы математического моделирования, позволившие оценить сезонную динамику валовой первичной продукции и общего дыхания экосистемы. Показано, что тундровые экосистемы могут усиливать сток углекислого газа из атмосферы под действием локального потепления. Эти результаты свидетельствуют о наличии отрицательных обратных связей в системе: климат–растительность–почва–мерзлота, а не только положительных, как полагали ранее.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие значительное распространение получил микрометеорологический метод оценки баланса газовых потоков в наземных экосистемах [3, 6, 7, 8, 12 и др.]. Этот метод позволяет осуществить непрерывные измерения газовых потоков на площадных масштабах от десятков до сотен га. Математическая теория метода [3] базируется на законе сохранения вещества в единице объема воздуха, из которого после преобразования при ряде допущений следует, что по ковариации флуктуаций вертикальной скорости ветра и концентрации химического вещества можно рассчитать поток этого вещества в граничном слое между экосистемой и атмосферой.

Указанные флуктуации вертикальной скорости ветра и концентрации газообразного вещества происходят с частотой порядка единиц герц, поэтому для их регистрации необходимо использовать быстрое и чувствительное оборудование. Флуктуации вертикальной скорости ветра измеряются ультразвуковым анемометром, в то время как газовый анализатор выбирается в зависимости от вида газообразного вещества. При проведении микрометеорологических измерений потоков углекислого газа хорошо зарекомендовали себя открытые инфракрасные анализаторы. Площадь участка, баланс которого измеряется методом турбулентной ковариации, определяется высотой размещения измерительного оборудования. Для большего охвата требуется более высокое размещение оборудования, поэтому для полу-

чения наиболее масштабных оценок измерительное оборудование размещается на самолетах [5].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микрометеорологические исследования потоков CO₂ были начаты в июле 2000 г. [15] в окрестностях пос. Лаврентия (Чукотский п-ов). Объектом исследования служила мелкобугорковая типичная дальневосточная тундра в 4 км к северо-западу от пос. Лаврентия. Для исследуемой экосистемы характерен выраженный криогенный микрорельеф, представленный микроповышениями (бугорки и кочки) и микропонижениями (депрессии, ложбины, межкочковые пространства). Для микроповышений доминирующими кустарниками и кустарничками являются *Salix pulchra*, *Betula exilis*, *Ledum decumbens*, *Vaccinium vitis-idaea* и *V. uliginosum*. Травянистые растения представлены *Eriophorum vaginatum*, *Carex lugens*, *C. rariflora*, *Poa arctica* и рядом других. В хорошо развитом мохово-лишайниковом покрове присутствуют *Aulacomnium turgidum*, *Hylocomium alascanum*, *Ptilidium ciliare*, *Decranum* sp., *Polytrichum* sp., *Thamno- lia vermicularis*, *Dactylina arctica*, *Peltigera* sp., *Cladonia* sp. и *Cetraria* sp. Пониженные увлажненные микроместообитания заняты в основном *Eriophorum vaginatum* и *Carex stans* с участием *Salix pulchra* в нижнем ярусе. Болотные (*Sphagnum* sp.) и зеленые мхи (*Aulacomnium turgidum*, *Hylocomium alascanum*, *Ptilidium ciliare*) развиты слабо.

Преобладающим типом почвы в исследуемой экосистеме является торфяно-глеезем с небольшими включениями торфяно-криоземов, торфя-

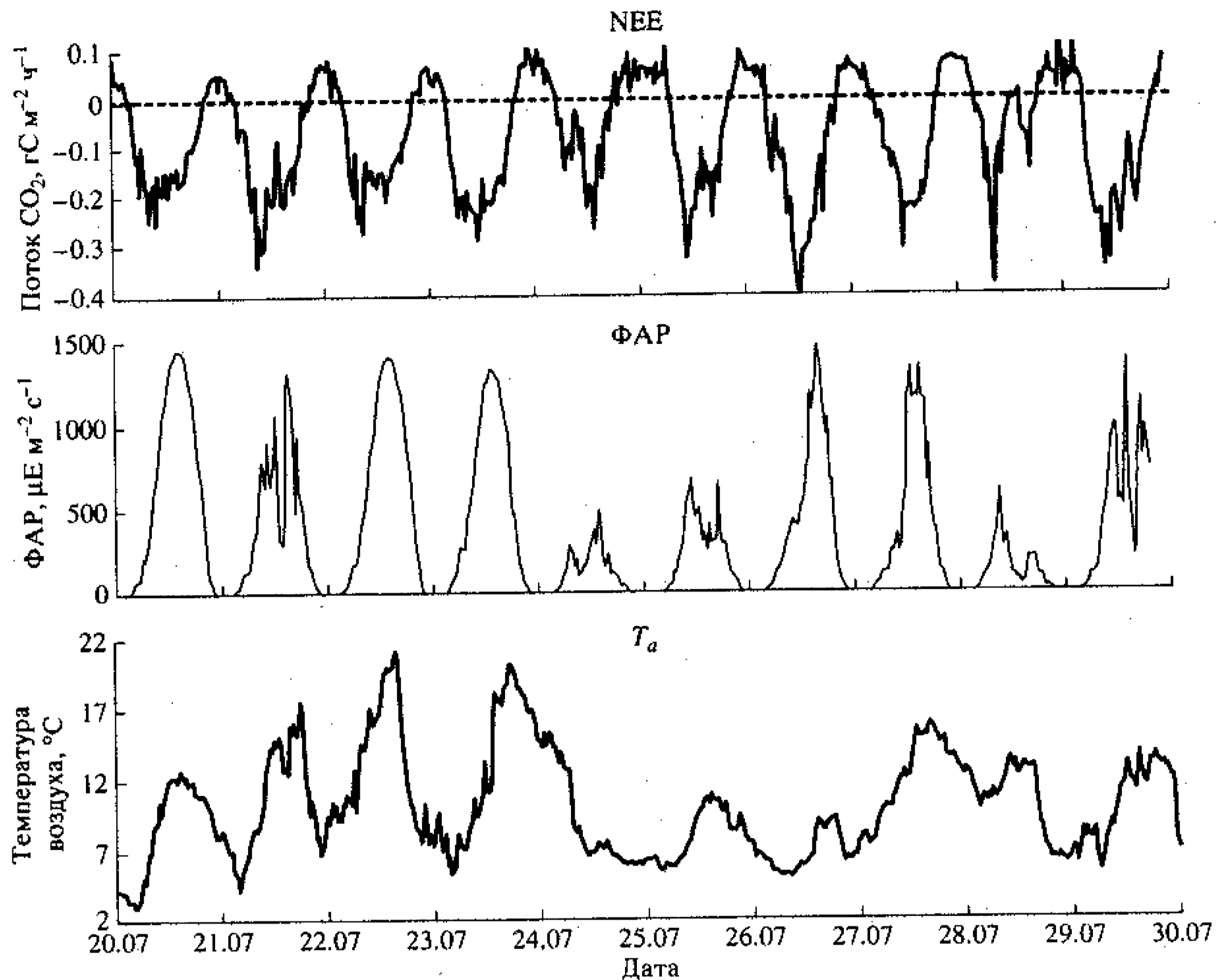


Рис. 1. Суточная динамика потока углекислого газа (NEE), ФАР и температуры воздуха (T_a) в типичных тундрах Чукотского п-ова по результатам микрометеорологических измерений с 20 по 30 июля 2001 г.

нистых глееземов и торфянистых криоземов. Суммарная толщина органических горизонтов (подстилка, торфа различной степени разложения) варьирует от 10 до 40 см. Средняя глубина оттаивания почвы в конце теплого сезона составляла в различные годы от 70 до 73 см. Среднесезонный уровень грунтовых вод находился в 2000 г. на 12 см, в 2001 г. на 21 см и в 2002 г. на 38 см от поверхности почвы.

В качестве компонентов микрометеорологической установки использовали ультразвуковой анемометр фирмы "GIL" и открытый инфракрасный газоанализатор NOAA. Измерительное оборудование было размещено на высоте 3 м, что дало возможность оценить поток углекислого газа с площади порядка 13 га. Регистрацию ветровых условий и концентраций углекислого газа проводили в непрерывном режиме с частотой 10 Гц, показания приборов поступали на портативный компьютер. На 30-минутных интервалах проводился расчет величин ковариации вертикальной скорости ветра и концентрации углекислого газа,

используемых далее для расчетов потоков. Микрометеорологическая установка регистрировала также направление ветра, его горизонтальную скорость и концентрацию водяного пара. Для регистрации прочих метеорологических характеристик был использован логгер Campbell 21X. С его помощью для 30-минутных интервалов записывали температуры воздуха и почвы, относительную влажность воздуха и интенсивность ФАР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пример данных, получаемых с помощью микрометеорологических измерений, представлен на рис. 1. По принятой в микрометеорологии схеме мы используем область отрицательных значений для стока углерода из экосистемы в атмосферу и положительных – для источника. Четко виден суточный ход потока углекислого газа (NEE), для которого в период разгара вегетационного сезона характерно поглощение днем в результате фотосинтеза и выделение ночью в результате дыха-

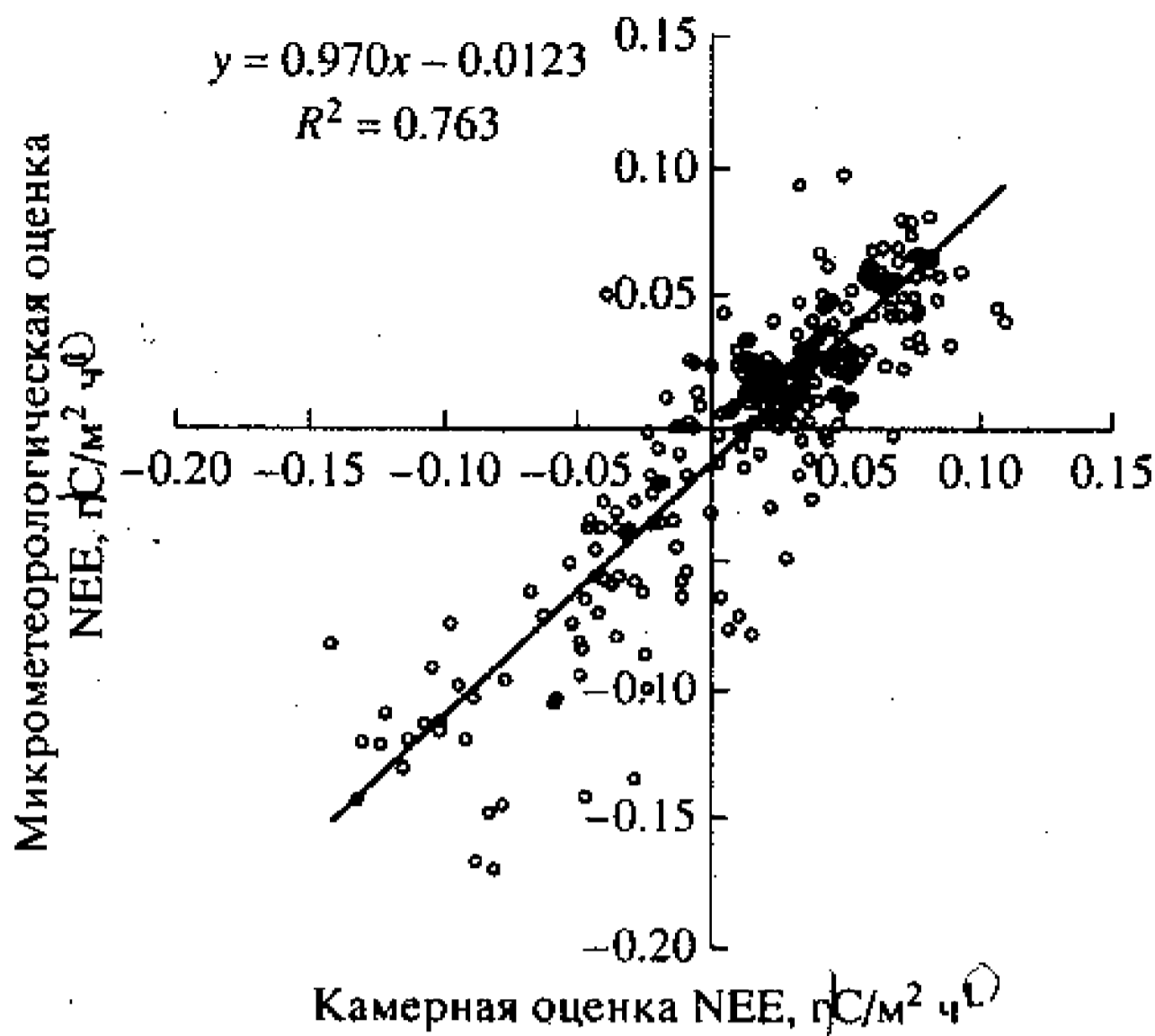


Рис. 2. Сравнение величин NEE, полученных камерным и микрометеорологическим методами.

ния. Как по продолжительности, так и по абсолютной величине дневной сток значительно превышает ночной, и потому в расчете на сутки тундра является стоком углерода.

Одновременно с микрометеорологическими измерениями проводились камерные исследования газообмена CO₂, методика которых была подробно охарактеризована авторами в соответствующих публикациях [14, 15]. Сравнение данных, полученных разными методами, приводит к заключению об их удовлетворительном совпадении (рис. 2).

Суточные величины NEE рассчитывали как интеграл по значениям внутрисуточной динамики. Отметим, что в 2000 г. измерения были начаты 23 июля, а в 2001 г. – 19 июня, то есть полученная в эти годы информация характеризует только часть вегетационного сезона. Картина сезонной динамики NEE (рис. 3) приводит к заключению, что типичные тундры Чукотского п-ова в летнее время являются стоком CO₂ из атмосферы, а переход с летнего стока на осенний источник происходит, как правило, в конце августа – начале сентября. Для корректного сравнения газообмена в разные годы ограничимся временным интервалом, соответствующим периоду измерений в 2002 г. (23 июля – 30 сентября). В 2000 г. тундра за этот период поглотила из атмосферы 25.7, в 2001 г. 41.9, в 2002 г. 47.4 г С м⁻².

Величина NEE является суммой разнонаправленных потоков, то есть валовой первичной про-

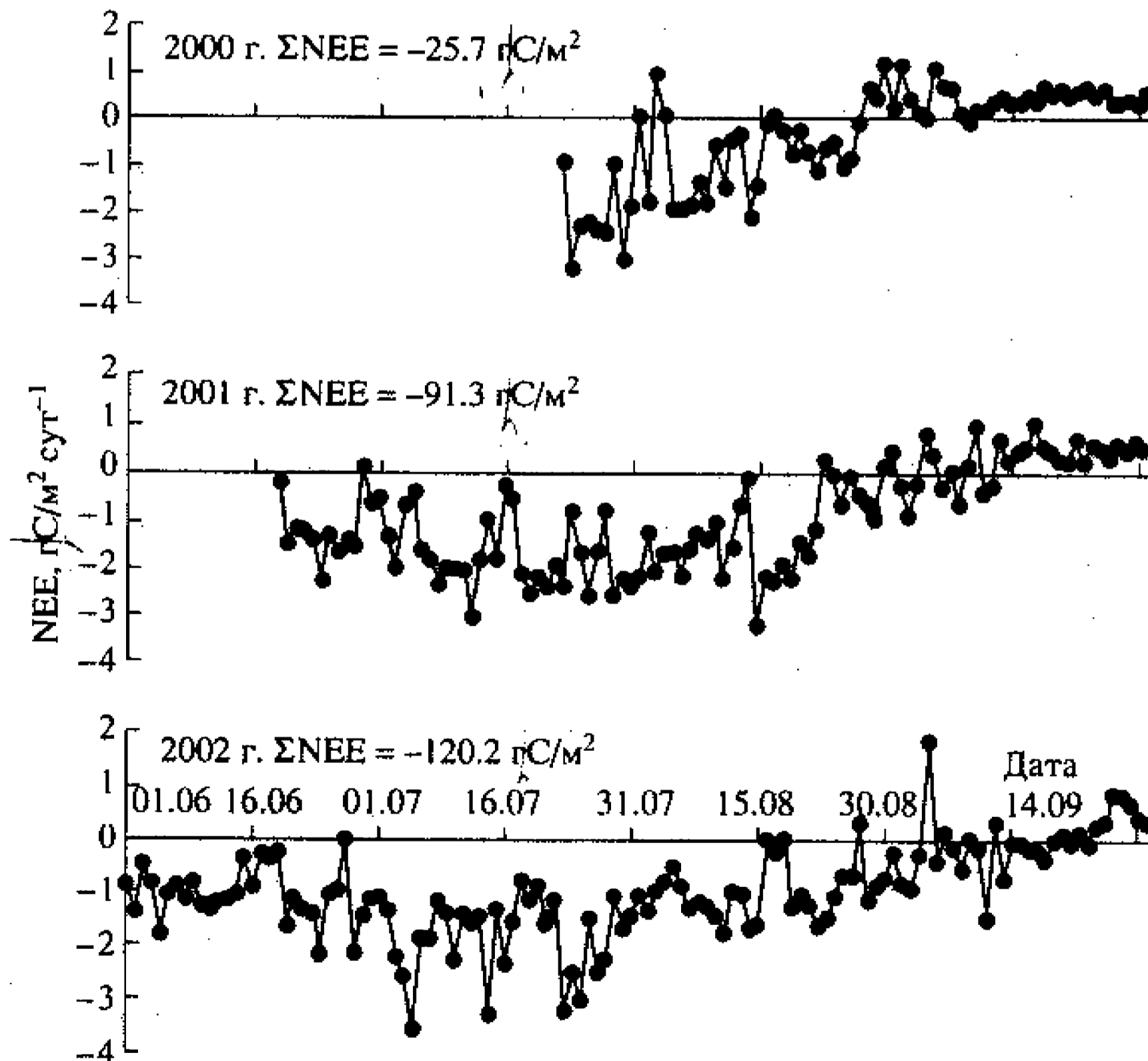


Рис. 3. Сезонная динамика балансового потока CO₂ (NEE) в типичных тундрах Чукотского п-ова за теплый период 2000–2002 гг.

Сравнительная характеристика газообмена CO_2 типичных тундр Чукотского п-ова за вторую половину теплого сезона 2000–2002 гг. (23 июля – 30 сентября)

Год	Средняя температура воздуха, °С	Средняя ФАР, $\mu\text{E}/\text{m}^2 \text{c}^{-1}$	Суммарные потоки CO_2 , $\text{гC}/\text{м}^{-2}$		
			ER	GPP	NEE
2000	3.8	200.7	82.9	-108.6	-25.7
2001	5.3	221.5	96.4	-138.3	-41.9
2002	6.4	261.9	114.0	-161.4	-47.4

дукции (GPP) и валового дыхания экосистемы (ER). Для понимания найденных различий в величинах NEE за годы исследований желательно иметь оценки GPP и ER. Микрометеорологический метод не позволяет напрямую измерить эти величины, однако предоставляет информацию, достаточную для моделирования. В ночное время (рис. 1) при малых или нулевых величинах ФАР продукционные процессы отсутствуют, и потому значения NEE в это время равны ER. Используя экспоненциальное уравнение [9], можно оценить зависимость ER от температуры и на основе его рассчитать значения дыхания экосистемы в светлое время суток. Далее по разности NEE и ER оцениваются значения GPP.

Анализ информации, полученной за годы исследований, показал, что коэффициенты экспоненциального уравнения зависимости ER от температуры меняются в течение теплого сезона. При одних и тех же температурах дыхание экосистемы выше на пике вегетационного сезона, чем в его начале или конце. Поэтому нами было предложено уравнение с 4 параметрами (d_1, d_2, d_3, k), в котором независимой переменной помимо температуры (T) является порядковый номер дня с начала года (JD):

$$ER = (d_1 JD^2 + d_2 JD + d_3) \exp(kT).$$

Это уравнение позволило с достаточной точностью аппроксимировать величины ER по значениям температуры (в нашем случае температуры почвы на глубине 5 см) для всего теплого периода данного года и с использованием измеренных величин NEE рассчитать GPP.

Проведем сравнение значений основных абиотических факторов и потоков CO_2 в типичных тундрах Чукотского п-ова (таблица) для второй половины теплого сезона 2000–2002 гг. Температура воздуха в 2001 г. была в 1.4, а в 2002 г. в 1.7 раза выше, чем в 2000 г. Несколько выше были и среднесезонные значения ФАР (соответственно в 1.1 и 1.3 раза). Рост температуры и понижение уровня грунтовых вод привели к росту дыхания экосистемы (в 1.2 и 1.4 раза), однако валовая продукция увеличилась в большей степени (в 1.3 и 1.5 раза),

что выразилось в увеличении стока углекислого газа из атмосферы (в 1.6 и 1.8 раза). Можно предположить, что температуры, имевшие место в 2000–2001 гг., были меньше температурного оптимума для валовой первичной продукции в исследуемой экосистеме, в результате увеличение температуры привело к опережающему росту продукции и усилению поглощения CO_2 тундрами.

Погодные условия 2000 г. были близки к среднесезонным, и потому функционирование тундры в этом году может рассматриваться как эталонное для второй половины XX столетия. 2002 г. обладал ярко выраженными климатическими аномалиями, охарактеризованными выше. Можно сделать вывод, что в условиях Чукотского п-ова локальная климатическая аномалия 2002 г. привела к опережающему росту первичной продукции по сравнению с деструкцией и увеличению стока углерода из атмосферы. Эти результаты свидетельствуют о наличии отрицательных обратных связей в системе: климат–растительность–почва–мерзлота, а не только положительных, как полагали ранее [1, 2, 10, 11]. Обнаруженные процессы могут обуславливать сток углекислого газа из атмосферы в северных широтах, что подтверждается модельными расчетами с использованием данных по химии атмосферы [4, 13].

Благодарности. Работа выполнена при поддержке международного проекта по исследованию потоков вещества и энергии в арктических экосистемах (National Science Foundation, Arctic Systems Science, Land-Atmosphere-Ice-Interactions Program, OPP-9216109) и темы 10 “Методы оценки пулов и потоков парниковых газов в наземных экосистемах, обоснование механизмов их регулирования” Минпромнауки РФ. Авторы благодарны руководителю Чукотской группы научной поддержки Г.М. Зеленскому (пос. Лаврентия) за помощь в организации полевых работ и А.А. Гладкову (Москва) за осуществление почвенного блока научной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимов С.А., Давыдов С.П., Просянкин С.Ф., Воронаев Ю.В., Семилетов И.П. Почвы Севера – генератор углекислоты // Вестник АН СССР. 1991. № 8. С. 71–83.
2. Семилетов И.П. Глобальное потепление и цикл углерода в Арктике // Вестник ДВО РАН. 1997. № 4. С. 75–85.
3. Baldocchi D.D., Valentini R., Running S., Oechel W., Dahlman R. Strategies for measuring and modelling of carbon dioxide and water vapour over terrestrial ecosystems // Global Change Biology. 1996. V. 2. P. 159–168.
4. Ciais P., Tans P.P., Troiler M., White J.W.C., Francey R.J. A large northern hemisphere terrestrial CO_2 sink indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 // Science. 1995. V. 296. P. 1098–1101.

5. *Desjardins R.L., Hart R.L., MacPherson J.I., Schuepp P.H., Verma S.B.* Aircraft- and tower-based fluxes of carbon dioxide, latent and sensible heat // *J. Geophysical Research*. 1992. V. 97. P. 18 477–18 485.
6. *Eugster W., McFadden J.P., Chapin III F.S.* A comparative approach to regional variation in surface fluxes using mobile eddy correlation towers. *Boundary – Layer Meteorology*. 1997. V. 85. P. 293–307.
7. *Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.-M., Daube B.C., Wofsy S.C.* Measurements of carbon sequestration by long term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy // *Global Change Biology*. 1996. V. 2. P. 169–182.
8. *Lafleur P.M.* Growing season energy and CO₂ exchange at a subarctic boreal woodland // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. P. 9571–9580.
9. *Lloyd J., Taylor J.A.* On the temperature dependence of soil respiration // *Functional ecology*. 1994. V. 8. P. 315–323.
10. *Oechel W.C., Hastings S.J., Jenkins M., Riechers G., Grulke N., Vourlitis G.* Recent change of Arctic tundra ecosystems from a carbon sink to a source // *Nature*. 1993. V. 361. P. 520–523.
11. *Oechel W.C., Vourlitis G.L., Hastings S.J., Bochkarev S.A.* Change in Arctic CO₂ flux over two decades: effects of climate change at Barrow, Alaska // *Ecological Applications*. 1995. V. 5. P. 846–855.
12. *Oechel W.C., Vourlitis G.L., Hastings S.J., Hinzman L., Kane D.* Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal warming // *Nature*. 2000. V. 406. P. 978–981.
13. *White A., Cannel M.G.R., Friend A.D.* The high-latitude carbon sink: a model analysis // *Global Change Biology*. 2000. V. 6. P. 227–245.
14. *Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivaschenko A.I.* Sensitivity of tundra carbon balance to ambient temperature // *Water, air and soil pollution*. 2000. V. 119. № 1/4. P. 157–169.
15. *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.

Micrometeorological Assessment of Biogenic Fluxes of Carbon Dioxide in Typical Tundra Ecosystems of Eastern Chukotka

D. G. Zamolodchikov, D. V. Karelin, A. I. Ivaschenko, and V. O. Lopes de Gerenyu

The results of micrometeorological measurements of CO₂ fluxes in typical tundra ecosystems of the Chukotka Peninsula during the warm seasons of 2000–2002 are discussed. The seasonal dynamics of the gross primary production and ecosystem respiration are estimated using the methods of mathematical simulation. It is shown that tundra ecosystems can enhance the CO₂ sink from the atmosphere under the impact of local warming. These results demonstrate the presence of negative feedbacks in the climate–vegetation–soil–permafrost system.