

Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода

О.А. Краснов¹, S. Maksyutov², М.В. Глаголев^{3,7,8},
М.Ю. Катаев⁴, G. Inoue⁵, А.И. Надеев¹, В.Д. Шелевой^{6*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, 305-0053, Japan

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Россия

⁴Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Россия

⁵Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 227-8564, Japan

⁶Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр-т Академический, 10/3, Россия

⁷Институт лесоведения РАН
143030, пос. Успенское, Московская обл., Россия

⁸Югорский государственный университет
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия

Поступила в редакцию 24.06.2013 г.

Обсуждается метод статических камер для исследования газообмена на границе «почва–атмосфера», описывается автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода. Комплекс установлен и успешно функционирует в районе с. Плотниково Бакчарского района Томской области (56°51,29' с.ш., 82° 50,91' в.д.) с 1997 г. по настоящее время. Приводится методика обработки данных измерений, обсуждаются технические детали определения некоторых параметров методики.

Ключевые слова: парниковые газы, атмосферный метан, атмосферный диоксид углерода, газообмен на границе «почва–атмосфера», автоматизированный комплекс для измерения потоков; greenhouse gases, atmospheric methane, atmospheric carbon dioxide, ground–atmosphere gas-exchange; automated complex for flux measurement.

Введение

Метан (CH₄) и диоксид углерода (CO₂) являются одними из основных «парниковых газов», концентрация которых в атмосфере в значительной мере определяет ее температуру. Измерениям концентрации этих газов в атмосфере, в том числе в Западно-Сибирском регионе, посвящено значительное количество работ (например, [1, 2]). Болота аккумулировали огромные запасы природного углерода, часть которого, в результате процессов жизнедеятельности микроорганизмов и фотосинтеза, участвует в процессах обмена с атмосферой и поэтому должна учитываться в глобальном углеродном цикле.

Известны работы, в которых дана оценка объемов эмиссии/стока CH₄ и CO₂ на границе «болото–атмосфера» (например, [3–6]). Как правило, описываемые данные ограничены как краткосрочностью и локальностью измерений, так и значительной пространственно-временной изменчивостью потоков.

В значительной мере свободны от указанных недостатков микрометеорологические методы [7–10] и методы обратного моделирования ([11–14] и ссылки там). Однако при изучении особенностей динамики потоков в небольших масштабах времени (часы, сутки) или их подробной пространственной структуры (масштаб ~10⁻¹–10¹ м) эти методы уже не столь успешны. Обычно для решения таких задач используется метод стационарных (статических) камер [4, 6, 15].

Принципиальным недостатком метода являются значительные возмущения, вносимые в газовую систему почвы при врезании камеры. В результате газообмен по периметру основания камеры стано-

* Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru); Shamil Maksyutov; Михаил Владимирович Глаголев; Михаил Юрьевич Катаев (kataev.m@sibmail.com); Gen Inoue; Александр Иванович Надеев; Валентин Дмитриевич Шелевой.

вится существенно больше. Кроме того, камера оказывает избыточное давление на почву, которого она не испытывает в естественных условиях. Заметим здесь, что после некоторого периода времени камера «врастает» в почву и воздухопроницаемость почвы нормализуется. Но избыточное давление на почву возникает вновь и при отборе проб из камеры, когда исследователь приближается к ней. Очевидно, что эти недостатки связаны с необходимостью участия человека-оператора в измерениях.

В этой связи более приемлемы автоматизированные камерные системы, не требующие участия человека в измерениях [16–19]. Работа [16], по-видимому, является одной из пионерских в области автоматических реализаций камерного метода и посвящена измерению потока метана на рисовых полях. Значительный вклад в создание полуавтоматических [20–22] и автоматических [23–26] камерных систем измерения потоков метана и диоксида углерода внесли японские исследователи.

В настоящей статье представлены подробное описание методики измерений потоков CO_2 и CH_4 из почв методом статических камер, а также методика обработки данных. Приводятся и обсуждаются результаты измерений потоков газов из почв с помощью автоматизированного комплекса «Flux-NIES», разработанного коллективом специалистов из NIES (Tsukuba, Japan) и ИОА СО РАН. Комплекс установлен и успешно эксплуатируется с 1997 г. на Большом Васюганском болоте в Томской области (Россия).

1. Методика измерений

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри изолированной от атмосферы камеры. Предварительно в почву врезаются рамы-основания. Через некоторое время, необходимое для восстановления газопроницаемости почвы по периметру основания (обычно не более 2 мес), на них герметично устанавливаются камеры. Анализируемый воздух из камеры по трубкам, через управляемый электропневматический блок выбора камеры, подается на газоанализаторы. Обычно, в целях экономии электроэнергии, для откачки исследуемого воздуха используется одна воздушная помпа небольшой мощности (несколько единиц [л/мин]) с большим временным ресурсом. В блоке коммутации поток воздуха из рабочей камеры разделяется на два, меньший из которых (~ 20 мл/мин) поступает на блок газоанализаторов, а оставшаяся часть по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри камеры.

В зависимости от числа исследуемых объектов камер может быть несколько. В нормальном состоянии все камеры открыты, кроме одной (рабочей), из которой производится отбор воздуха на газоанализаторы. Очередность работы камер, продолжительность и время их открытия-закрытия определяются программой управления с логгера. Этот же логгер считывает и хранит данные измерений.

Дополнительно, с целью оценки влияния окружающей среды на процессы газообмена на границе «почва–атмосфера», в комплексе используются датчики:

- температуры, относительной влажности, давления атмосферы;
- количества атмосферных осадков;
- падающей и рассеянной солнечной радиации;
- температуры почвы, уровня свободной воды в почве и др.

2. Состав автоматизированного комплекса для измерения потоков газов из почвы в атмосферу методом статических камер

Как правило, исследования процессов природного газообмена на границе «почва–атмосфера» в задачах мониторинга атмосферы или при моделировании глобального углеродного цикла производятся в удаленных районах в отсутствие развитых транспортной и энергетической инфраструктур. В этой связи особое значение приобретают обеспечение электроэнергией и транспортировка операторов и грузов к месту проведения измерений. Число объектов исследования, как правило, определяется разнообразием типов исследуемых почв и растительности.

На рис. 1 представлена блок-схема комплекса для мониторинга газообмена на границе «почва–атмосфера» методом статических камер.

На основе вышеизложенного исследователями из NIES (Tsukuba, Japan) и ИОА СО РАН (Томск, Россия) была разработана автоматизированная система «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода на границе «почва–атмосфера». Особое внимание было уделено поиску недорогого датчика, позволяющего измерять фоновые концентрации атмосферного метана и обладающего малым энергопотреблением. Известные оптические приборы с рекордно низкой погрешностью измерений (например, фирмы «Picarro») на основе метода дифференциального поглощения в спектральных линиях метана, пригодные для измерения малых концентраций атмосферного метана, очень дорогостоящи и требуют присутствия квалифицированного оператора–охранника. Кроме того, такие приборы требуют достаточного (~ 1 кВт) электропитания и температурной стабилизации.

В комплексе «Flux-NIES» в качестве газоанализатора метана был выбран модифицированный в NIES полупроводниковый сенсор TGS 842 с чувствительным элементом на основе двуокиси цинка (SnO_2) [27]. Отметим, что принципиальным недостатком этого сенсора является необходимость стабилизации скорости потока, а также температуры и влажности прокачиваемого воздуха. С этой целью в канал подачи воздуха установлены регулятор потока, мембранный (MD-Series; gas drier MD-070-72 Perma pure) и химический (P_2O_5 ; с точкой росы минус 50 °C) осушители и регулируемый нагреватель анализируемого воздуха в металлической

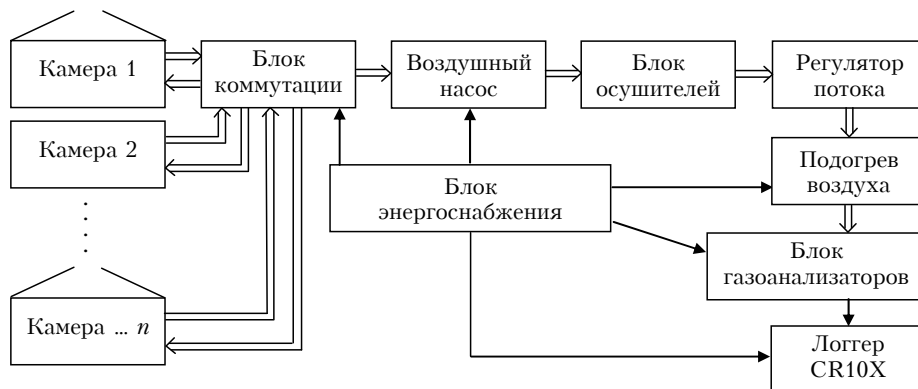


Рис. 1. Блок-схема комплекса. Камера 2 – закрытая (рабочая)

трубке перед датчиком метана до постоянной температуры (+ 40 °С). Эффективность осушителя снижается с увеличением его температуры, поэтому принимались дополнительные меры по вентиляции блока газоанализаторов. Для измерения концентрации CO₂ используется недисперсионный инфракрасный газоанализатор Li-Cor 820 (USA). Сигналы с обоих газоанализаторов записываются в памяти логгера CR10X (Campbell Scientific Corp., Canada).

В качестве блока дополнительных сенсоров в комплексе используются датчики:

- уровня воды в почве PDCR-1830 на глубине 1 м (дифференциальная схема);
- температуры почвы DS 1921 (°C) на трех глубинах (5; 10 и 30 см от поверхности);
- атмосферного давления OMEGA PX 2760;
- скорости и направления ветра WIND MONITOR YUNG05103;
- солнечной интегральной радиации – пириометр (радиометр) Eppley PIR S/N 32444F3 (Вт/м²);
- Kipp&Zonen model CM21 S/N 980558 (Вт/м²);
- измеритель уровня осадков (мм) YONG model 52203 S/N Tb009S;
- температуры и относительной влажности атмосферного воздуха VAISALA HMP45A(D).

3. Описание места проведения измерений

Комплекс «Flux-NIES» размещен на участке Бакчарского болота, представляющем собой северо-восточный отрог Большого Васюганского болота примерно в 16 км от с. Плотниково Бакчарского района Томской области, где располагается стационар «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (56°51,29' с.ш., 82°50,91' в.д.). Автоматические камеры были установлены в 1997 г. на мезотрофном открытом плоском увлажненном кочковатом участке болота, покрытом, в основном, травой и мхом. На этом участке представлен целый ряд растительных ассоциаций. Камеры были установлены таким образом, чтобы растительность в каждой из них соответствовала какой-либо характерной ассоциации (рис. 2).

Шесть одинаковых камер из оргстекла (рис. 3) герметично установлены на стальные основания, утопленные в почву, и с помощью трубок из полиэтилена высокого давления подсоединены к блоку газоанализаторов (рис. 4). Размеры основания камеры: 0,9×0,9 м; высота 0,5 м. Верхняя крышка камеры состоит из двух половин. Каждая часть

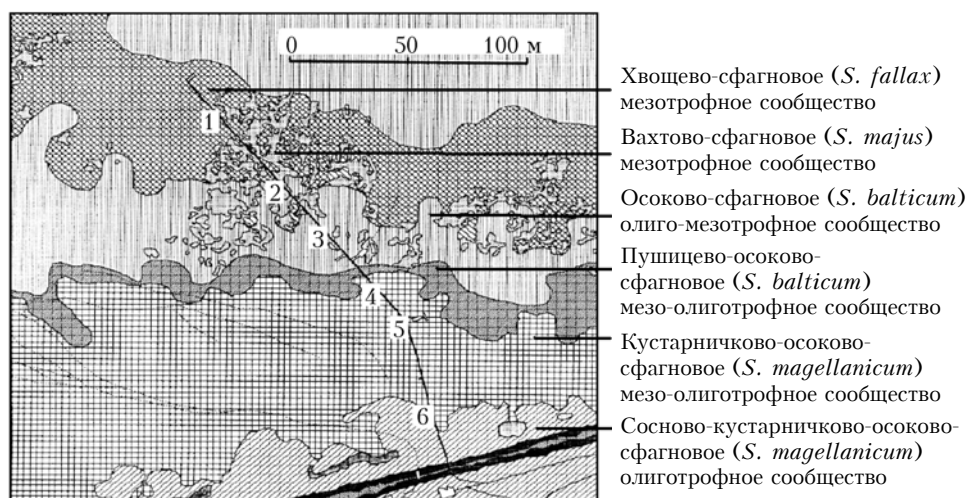


Рис. 2. Схема размещения измерительных камер на болоте

крышки по команде с логгера CR10X открывается с помощью пневматического привода (СКД Согр.). На каждой половине крышки установлен вентилятор, работающий от постоянного тока (100 мА, 12 В) для равномерного перемешивания воздуха в камере в момент отбора проб. Камеры (на рис. 2 отмечены цифрами) расположены вдоль линии от периферии болота к его центру. В нижней части рисунка жирными параллельными линиями показан дренажный канал, прорытый мелиораторами для осушения болота. Расстояние между крайними наиболее удаленными друг от друга камерами «1» и «6» примерно 180 м. Вдоль камер проложены деревянные тротуары, позволяющие оператору свободно передвигаться, не оказывая давления на почву.



Рис. 3. Внешний вид измерительной камеры

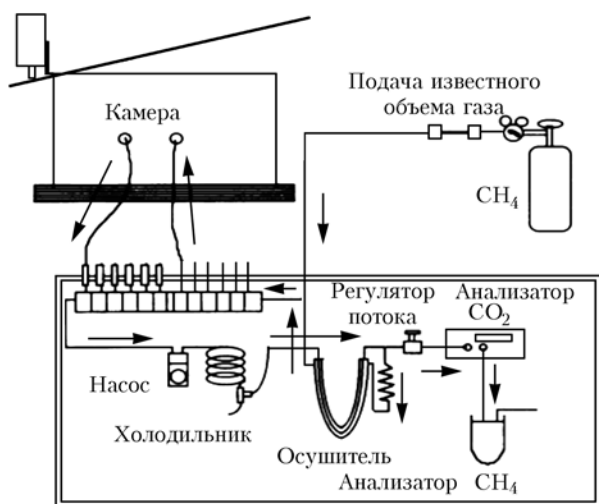


Рис. 4. Принципиальная схема измерительной системы [25]

Для открывания-закрывания створок камер используются пневматические цилиндры, в которые по команде с логгера CR10X подается сжатый воздух из отдельного баллона. Электроэнергия вырабатывается 12 солнечными панелями «Kyocera J-51», которые в светлое время суток через контроллер «Trace S40» заряжают 12 аккумуляторных батарей, емкостью 64 А/ч каждая. В темное время суток

для работы комплекса используется энергия, накопленная за день в аккумуляторах.

Так как при отборе проб воздуха используется одна воздушная помпа (ASF THOMAS 12 В, 8 л/мин), то при переключении каналов (трубок подачи исследуемого воздуха) скорость воздушного потока скачкообразно меняется от нуля до рабочего значения. Это приводит к искажениям сигналов газоанализаторов. В нашем случае (длина трубок от крайних камер до блока газоанализаторов около 90 м) время релаксации сенсоров достигает 11 мин.

На верхней плоскости камеры установлены две створки, которые при помощи пневмоприводов открываются вверх, и происходит проветривание камеры в промежуток времени между измерениями. Логгер управляет последовательным переключением трубок подачи воздуха из различных камер на газоанализаторы с помощью электропневматических клапанов. Два раза в сутки (в 03:30 и в 15:30) в течение 30 мин (10 + 10 + 10 мин) производится калибровка сенсоров газоанализаторов, для чего используются три баллона с известными концентрациями смеси калибровочных газов в среде искусственного воздуха. Значения концентраций калибровочных смесей в 1-м и 3-м баллонах немного выходят за диапазон изменения концентраций исследуемых газов в атмосфере при открытой камере (фоновые значения) и максимально возможных концентраций в закрытой камере, а значения концентрации газов во 2-м баллоне находятся примерно посередине таковых в 1-м и 3-м баллонах. Последние обычно определяются эмпирически при измерениях и зависят от конкретных параметров системы. В нашем комплексе значения калибровочных концентраций были выбраны равными (1,80; 3,20; 6,25 ppm) для CH_4 и (0,00; 310,0; 620,0 ppm) для CO_2 .

Условно измерения начинаются в 00:00. Каждый цикл измерений составляет 2 ч, в течение которых последовательно записываются сигналы от каждой из шести камер (по 20 мин на каждую камеру). Таким образом, в течение 1 сут происходит 12 циклов измерений. В качестве иллюстрации первичных данных на рис. 5 приведены 3 цикла измерений в виде сигналов сенсоров CH_4 (сплошная, мВ) и CO_2 (пунктирная линия, мВ) в светлое время суток (с 12:00 до 18:00) и скорость воздушного потока v , измеренная в магистрали сенсоров.

На кривых видны отклики датчиков на эмиссию двух калибровочных газов с различной концентрацией: 1,80 (CH_4) и 0,00 ppm (CO_2) в 15:40; 3,20 (CH_4) и 310,0 ppm (CO_2) в 15:48; 6,25 (CH_4) и 620 ppm (CO_2) в 15:56. В начале каждого измерения происходит переключение трубок прокачки воздуха от каждой из 6 камер, находящихся на различном удалении от блока газоанализаторов, что приводит к резкому изменению скорости потока воздуха. Это вызывает скачкообразное изменение чувствительности датчика метана, критичного к скорости прокачки воздуха. Для релаксации сигнала датчика требуется примерно 11 мин. На 14-й мин цикла камера закрывается и переходит в режим измерений. По величине сигнала на 12–14-й мин можно оценить фоновые значения концентрации газов в открытой

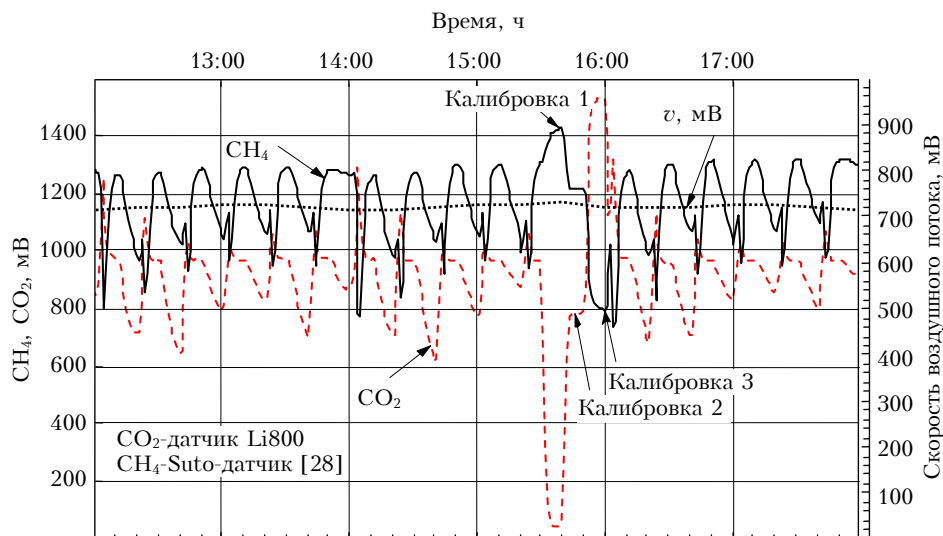


Рис. 5. Пример записи первичных сигналов (21 июля 2000 г., участок 1)

камере. Далее в течение 5 мин (с 13-й по 18-ю мин) происходит изменение концентрации исследуемого газа в закрытой камере в результате его накопления (или поглощения) частью экосистемы, ограниченной камерой. На 18-й мин камера открывается для проветривания.

Скорость газообмена оценивается по скорости изменения концентрации газа в закрытой камере (скорости изменения сигнала). Заметим, что уменьшение по амплитуде сигнала с датчика метана соответствует увеличению концентрации метана в камере (эмиссия метана из почвы). В свою очередь сигнал с датчика CO_2 отрицательный в светлое время (фотосинтез растений, приводящий к потреблению газа из атмосферы) и положительный в темное время суток, когда происходят эмиссия газа из почвы и накопление газа в камере («дыхание растений»).

4. Методика расчета потоков регистрируемых газов

Скорость газообмена на границе раздела сред можно оценить из следующих соотношений. Предположим, что за небольшой промежуток времени концентрация в камере изменяется линейно, тогда

$$C(t) = C(t_0) + F(t - t_0)S/V, \quad (1)$$

где $C(t)$ – концентрация исследуемого газа ($\text{мг}/\text{м}^3$) в камере через время t после начала измерений t_0 ; $C(t_0)$ – концентрация газа в момент времени t_0 ; S и V – соответственно площадь (м^2) и объем камеры (м^3); F – скорость эмиссии из почвы ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{ч}$).

Отсюда скорость эмиссии

$$F = \frac{(C - C_0) V}{(t - t_0) S}. \quad (2)$$

Выражения (1), (2) описывают общие принципы определения потока газов из почвы, однако не учитывают возможные технические детали, возникающие при реализации метода.

Например, зависимость между регистрируемым детектором напряжением и концентрацией метана может быть представлена выражением [27]:

$$V(t) = B(t) + \frac{S(t)}{a} \{1 - \exp[-aC_k(t)]\}, \quad (3)$$

$$C_k(t) = C_0(t) + \frac{F}{\gamma} [1 - \exp(-\gamma t)] + \sum_{i=1}^2 C_i^{in} \exp[-\gamma(t - t_i)] \Theta(t - t_i), \quad (4)$$

где $V(t)$ – напряжение на детекторе метана, мВ; t – текущее время, мин; $B(t)$ – базовая линия, мВ; $S(t)$ – чувствительность детектора ($60\text{--}120 \text{ мВ}/\text{ppm}$), она должна быть постоянной, однако ее поведение со временем неизвестно; a – коэффициент чувствительности детектора ($0,03\text{--}0,06 \text{ ppm}^{-1}$); $C_k(t)$ – концентрация метана в камере, ppm; $C_0(t)$ – фоновая концентрация метана, ppm; F – скорость возрастания концентрации в камере за счет эмиссии метана из почвы ($0\text{--}3 \text{ ppm}/\text{мин}$); γ – частота утечки метана в закрытой камере ($0\text{--}0,02 \text{ мин}^{-1}$); C_i^{in} – концентрация метана, ppm, вызванная i -й инъекцией; t_i – время впрыска i -й инъекции; $\Theta(t)$ – функция единичного скачка (равна нулю при $t \leq 0$ или единице при $t > 0$).

Недостаток формулы (3) заключается в том, что она не учитывает ни время задержки (необходимое для попадания содержимого камеры на детектор и обратно), ни реакцию самого детектора на изменение концентрации метана.

Для того чтобы учесть реакцию детектора на изменение концентрации метана, необходимо знать его реакцию на единичный скачок $\Theta(t)$. Для этого нами была получена следующая формула:

$$A(t) = 1 - \exp(-Gt), \quad (5)$$

где $A(t)$ – реакция детектора метана на единичный скачок; G – частота утечки метана из соединений

подводящих трубок и недостаточной герметичности ($0-5 \text{ мин}^{-1}$). Систему «камера–детектор», согласно теории линейных систем управления [28], можно рассматривать как устройство, состоящее из последовательного соединения отдельных устройств камеры и детектора. Теперь регистрируемую детектором метана концентрацию находим из следующего выражения:

$$C(t) = \int_0^t C_k(t - t_z - \tau) A(\tau) d\tau, \quad (6)$$

или

$$\left. \begin{aligned} C(t) &= C_0(t) + Flux(t) + Inj(t), \\ Flux(t) &= \frac{F}{\gamma} (1 - e^{-G(t_0 - t_c)}) + \frac{FG}{\gamma(\gamma - G)} e^{-\gamma(t - t_c - t_z)} (1 - e^{-(\gamma - G)(t_0 - t_c)}), \\ Inj(t) &= \sum_{i=1}^2 C_i^{in} \frac{G}{G - \gamma} e^{-\gamma(t - t_i - t_z)} (1 - e^{-(\gamma - G)(t - t_i)}) \Theta(t - t_i - t_z), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $C(t)$ – концентрация метана на детекторе в момент времени t ; t_z – время задержки сигнала, мин; t_0 – время предстоящего (относительно текущего времени) открытия камеры; t_c – время прошедшего (относительно текущего времени) закрытия камеры.

Соответственно, вместо выражения (3) запишем формулу

$$V(t) = B(t) + \frac{S(t)}{a} \{1 - \exp[-aC(t)]\}. \quad (8)$$

5. Расчет потоков метана

Для практического применения формул (5), (6) необходимо сделать предположение, что величины $B(t)$, $S(t)$, $C_0(t)$ являются неизвестными в течение 1 ч. Также неизвестны константы a , γ , G и F . Для их поиска с помощью метода наименьших квадратов минимизируется квадрат невязки между

реальными значениями напряжения на детекторе метана (в течение 1 ч работы активной камеры) и расчетным напряжением (8). Таким образом, мы получаем величины $B(t)$, $S(t)$, $C_0(t)$, зависящие от времени с дискретностью 1 ч и величины a , γ , G , F , зависящие от конкретного экземпляра камеры и конкретного типа почвы.

В качестве примера рассчитаем указанные неизвестные величины за время с 20:00 до 21:00 ч 6 июня 2009 г. по формулам (3) и (4). Их значения составили: $F = 0,21 \text{ ppm/мин}$; $B = 1078,61 \text{ мВ}$; $S = 96,76 \text{ мВ/ppm}$; $a = 0,03 \text{ ppm}^{-1}$; $C_0 = 1 \text{ ppm}$; $\gamma = 10^{-5} \text{ мин}^{-1}$. Сравнение реально зафиксированных значений напряжения на детекторе и расчетных с только что упомянутыми оптимальными величинами B , S , C_0 , a , γ , G , F по формулам (3), (4) приведено на рис. 6. Видно, что формула (3) не учитывает время, необходимое на прохождение воздуха из камеры до детектора. Также из рис. 6 видно, что неучтенными остаются переходные процессы между закрытым и открытым состояниями камеры.

Теперь рассчитаем эти же неизвестные величины за этот же самый период времени по формулам (7) и (8): $F = 0,28 \text{ ppm/мин}$; $B = 1087,44 \text{ мВ}$; $S = 120 \text{ мВ/ppm}$; $a = 0,04 \text{ ppm}^{-1}$; $C_0 = 1 \text{ ppm}$; $\gamma = 0,02 \text{ мин}^{-1}$; $G = 0,4 \text{ мин}^{-1}$. Из рис. 7 видно, что кривая напряжения, полученная по новой методике, практически совпадает с кривой реально измеренного напряжения детектора, в то время как на рис. 6 наблюдается значительное отличие кривой, полученной по старой методике, от реальной.

Как указывалось выше, одним из подгоночных параметров модели является искомым параметр – поверхностная плотность потока метана F , $\text{мг/м}^2/\text{ч}$. Сравнение величин потоков, найденных по старой и новой методике, показывает, что F увеличилась на 33% в период времени с 20:00 до 21:00 6 июня 2009 г. Заметим, что в этот период не было сильных помех. Для других моментов времени старая методика также дает заниженные значения эмиссии потока газа.

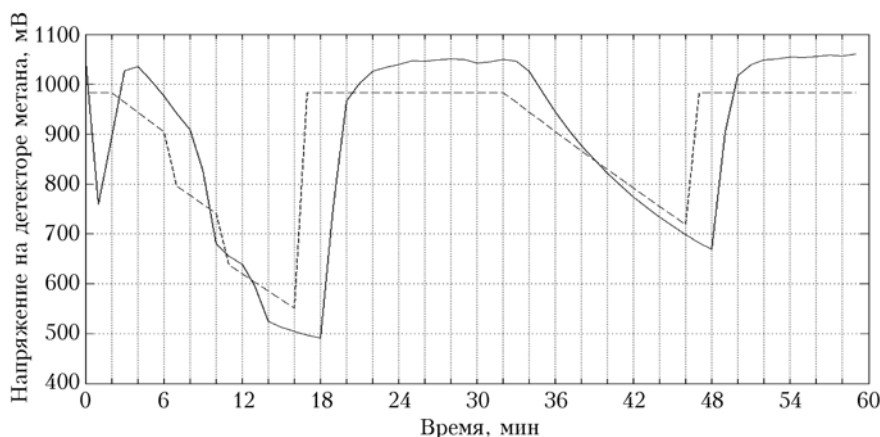


Рис. 6. Реально измеренное напряжение на детекторе метана (сплошная линия) и расчетное (формула (3) – пунктир) за время с 20:00 до 21:00 6 июня 2009 г.

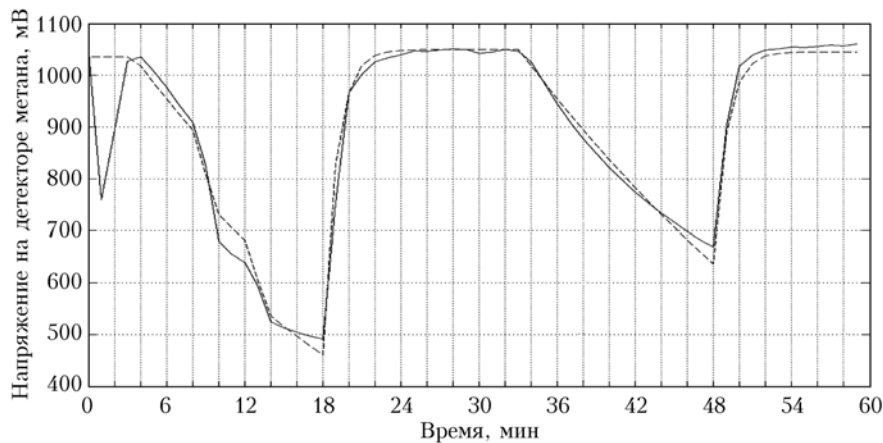


Рис. 7. Реально измеренное напряжение на детекторе метана (сплошная линия) и расчетное (формула (8) – пунктир) за время с 20:00 до 21:00 6 июня 2000 г.

Заключение

Представлено описание автоматизированного комплекса «Флукс-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода. Комплекс установлен и уже в течение 15 лет успешно функционирует в районе с. Плотниково Бакcharского района Томской области. Ежегодно время работы комплекса определяется метеословениями, состоянием аппаратуры и обычно начинается в мае, а заканчивается в октябре, что захватывает основные фазы развития растительности и сезонные изменения гидрологического режима болот. Приводится методика обработки данных измерений, и обсуждаются технические детали определения некоторых параметров методики.

1. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория ТУ-134 «Оптик» // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофонов А.В., Бабченко С.В., Иноуэ Г., Machida T., Maksyutov S., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
3. Matthews E., Fung I. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources // Global Biogeochem. Cycles. 1987. V. 1. P. 61–86.
4. Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykänen H., Martikainen P.J. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland // Oecologia. 1997. V. 110, N 3. P. 423–431. DOI: 10.1007/s004420050177.
5. Glagolev M.V., Golovatskaya E.A., Shnyrev N.A. Greenhouse Gas Emission in West Siberia // Contemporary problems of Ecology. 2008. V. 1, N 1. P. 136–146.
6. Chen H., Wu N., Gao Y., Wang Y., Luo P., Tian J. Spatial variations on methane emissions from Zoige alpine wetlands of Southwest China // Sci. Total Environ. 2009. V. 407. P. 1097–1104.

7. Fan S.M., Wofsy S.C., Bakwin P.S., Jacob D.J., Anderson S.M., Keenan P.L., McManus J.B., Kolb C.E. Micrometeorological Measurements of CH₄ and CO₂ Exchange between the Atmosphere and Subarctic Tundra // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 97, N 15. P. 16627–16643.
8. Friborg T., Christensen T.R., Hansen B.U., Norstroem C., Soegaard H. Trace gas exchange in a high-arctic valley: 2. Landscape CH₄ fluxes measured and modeled using eddy correlation data // Global Biogeochem. Cycles. 2000. V. 14, N 3. P. 715–723.
9. Nozhevnikova A., Glagolev M., Nekrasova V., Einola J., Sormunen K., Rintala J. The analysis of methods for measurement of methane oxidation in landfills // Water Sci. Technol. 2003. V. 48, iss. 4. P. 45–52.
10. Archibald S.A., Kirton A., van der Merwe M.R., Scholes R.J., Williams C.A., Hanan N. Drivers of inter-annual variability in Net Ecosystem Exchange in a semiarid savanna ecosystem, South Africa // Biogeosciences. 2009. V. 6. P. 251–266. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/251/2009/bg-6-251-2009.pdf> (дата обращения: 19.12.2010).
11. Desyatkov B.M., Borodulin A.I., Kotlyarova S.S. Determination of Flow of Aerosol Particles Flow, Emitted from Underlying Surface, by Solving Inverse Problem of their Dispersion in the Atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 1997. V. 10, N 6. P. 639–644.
12. Bergamaschi P., Frankenberg C., Meirink J.F., Krol M., Dentener F., Wagner T., Platt U., Kaplan J.O., Körner S., Heimann M., Dlugokencky E.J., Goede A. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, D02304, DOI: 10.1029/2006D007268.
13. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1, № 1. С. 17–36. URL: [http://www.ugrasu.ru/uploads/files/Glagolev%20\(1\).pdf](http://www.ugrasu.ru/uploads/files/Glagolev%20(1).pdf) (дата обращения: 30.07.2010).
14. Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M.V., Machida T., Patra P.K., Sudo K., Inoue G. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, N 3. 035201. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035201.
15. Nakano T., Sawamoto T., Morishita T., Inoue G., Hatanoto R. A comparison of regression methods for estimating soil-atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-

- chamber technique // *Soil Biol. Biochem.* 2004. V. 36. P. 107–113.
16. Schütz H., Holzappel-Pschorn A., Conrad R., Rennenberg H., Seiler W. A 3-Year Continuous Record on the Influence of Daytime, Season, and Fertilizer Treatment on Methane Emission Rates from an Italian Rice Paddy // *J. Geophys. Res.* 1989. N 94. P. 16405–16416.
 17. Marik T., Fischer H., Conen F., Smith K. Seasonal variations in stable carbon and hydrogen isotope ratios in methane from rice fields // *Global Biogeochem. Cycles.* 2002. V. 16, N 4. 1094.
 18. Butterbach-Bahl K., Kock M., Willibald G., Hewett B., Buhagiar S., Papen H., Kiese R. Temporal variations of fluxes of NO, NO₂, N₂O, CO₂, and CH₄ in a tropical rain forest ecosystem // *Global Biogeochem. Cycles.* 2004. V. 18. GB3012.
 19. Graf A., Weihermüller L., Huisman J.A., Herbst M., Bauer J., Vereecken H. Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity of soil respiration in field studies // *Biogeosciences.* 2008. V. 5, N 4. P. 1175–1188. URL: <http://www.biogeosciences.net/5/1175/2008/bg-5-1175-2008.pdf>
 20. Inoue G., Takahashi Y., Maksyutov S., Sorokin M., Panikoff N. Methane Emission Rate from the Wetland in West Siberia and Its Controlling Factors // *Proc. Fifth Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996.* Tsukuba: Isebu, 1997. P. 34–39.
 21. Nakano T., Fukuda M., Utsumi M., Inoue G. Measurements of Methane Flux at a Burnt Forest in West Siberia: Preliminary Results // *Proc. Eighth Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999.* Tsukuba: Isebu, 2000. P. 160–164.
 22. Nakano T., Inoue G. Development of an Automatic System for the Field Measurement of Methane Flux // *Proc. Fifth Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996.* Tsukuba: Isebu, 1997. P. 45–49.
 23. Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. Automatic Measurements of Methane Flux in West Siberian Wetlands in 1997 Summer // *Proc. Sixth Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997.* Tsukuba: Isebu, 1998. P. 211–215.
 24. Sorokin M., Maksyutov S., Inoue G., Nakano T. Fully Methane Flux Measurements System by a Static Chamber Method // *Proc. Sixth Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997.* Tsukuba: Isebu, 1998. P. 207–210.
 25. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. Methane fluxes from wetland in West Siberia during April–October 1998 // *Proc. Seventh Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998.* Tsukuba: Isebu, 1999. P. 115–124.
 26. Krasnov O., Maksyutov S., Shimoyama K., Suto H., Nadeev A., Shelevoi V., Glagolev M., Kosykh N., Machida T., Inoue G. Automatic chamber observations of methane and carbon dioxide fluxes at West Siberian wetland // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010.* 2010. Abstract #GC33A-0921. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMGC33A0921K> (дата обращения: 03.01.2011).
 27. Suto H., Inoue G. A New Portable Instrument for In Situ Measurement of Atmospheric Methane Mole Fraction by Applying an Improved Tin Dioxide-Based Gas Sensor // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2010. V. 27. P. 1175–1184.
 28. Мирошник И.В. Теория автоматического управления: Линейные системы. СПб.: ПИТЕР, 2005. 337 с.

O.A. Krasnov, S. Maksyutov, M.V. Glagolev, M.Yu. Kataev, G. Inoue, A.I. Nadeev, V.D. Shelevoi.
Automated complex “Flux-NIES” for measurement of methane and carbon dioxide fluxes.

The static chambers method and an automatic sampling and analyses system «Flux-NIES» for measuring methane and carbon dioxide fluxes from soil to atmosphere are described. Analytic system uses semiconductor sensor for methane and NDIR for carbon dioxide. System was installed and worked since 1997 to the present time near Plotnikovo settlement (Vasyugan bog) (56°51.29' N, 82°50.91' E) of Tomsk region. The technical detail of system and calculation method are represented.