МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОГО ХОДА УГЛЕРОДНОГО ОБМЕНА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Е.А. Дюкарев^{1,2}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия;

²Югорский государственный университет, 628012, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия
dekot@mail.ru

Аннотация. В работе обобщены результаты экспедиционных исследований по изучению биологической продуктивности, потоков углекислого газа в болотных экосистемах Средней Тайги Западной Сибири. Измерения потоков углекислого газа проводились в период с 7 по 14 июля 2019 г. в шести пунктах исследований, расположенных на территории типичных болотных экосистем эвтрофного, мезотрофного и олиготрофного типов с учетом разнообразия микроландшафтов. Автоматические измерения потока CO_2 проводились с помощью системы почвенного дыхания Licor LI-8100A.

Для распространения полученных данных наблюдений на другие периоды исследований и рассчитать годовой углеродный баланс экосистемы, была предложена модель чистого экосистемного обмена (NEE) с помощью которой рассчитаны суммарные потоки парниковых газов за вегетационный сезон. Модель использует температуру воздуха, приходящую фотосинтетически активную радиацию в качестве объясняющих факторов для валовой первичной продукции и дыхания экосистем. Модель была откалибрована в соответствии с натурными измерениями потоков углекислого газа. Для каждого пункта наблюдений определены шесть параметров: два параметра для модели фотосинтеза) два параметра для модели дыхания и два – для модели роста биомассы. В результате расчетов для периода с мая по октябрь 2019, получены временные ряды потоков поглощения углекислого газа растительностью в процессе фотосинтеза, выделения CO_2 в процессе экосистемного дыхания и результирующий поток – чистый экосистемный обмен. В годовом ходе увеличение интенсивности фотосинтеза в дневные часы связано как с годовым ходом солнечной радиации, так и с накоплением биомассы растений в процессе фотосинтеза. Получено, что суммарный экосистемный обмен варьирует сильнее, чем его составляющие. NEE для экосистем без растительного покрова всегда положительный. Для мочажины ГМК и открытой транзитной мезотрофной топи в любой день вегетационного периода NEE отрицательный. Для остальных экосистем наблюдаются как положительные, так и отрицательные средние суточные значения потоков.

Болотные экосистемы с большими запасами биомассы, в том числе и в древесном ярусе, имеют значительные потоки (более $1500 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$) связанные с фотосинтезом, однако в них же велика и расходная составляющая углеродного обмена ($750\text{--}2200 \text{ г/м}^2$). В результате получено, что наибольшее итоговое поглощение углекислого газа наблюдается на мезотрофной осоково-вахтовой топи (1062 г/м^2) и в низком ярусе, с учетом древесного яруса (603 г/м^2). Остальные болота накапливают $244\text{--}466 \text{ г/м}^2$ из атмосферы в течение вегетационного сезона.

Ключевые слова: углеродный баланс, углекислый газ, математическое моделирование, чистая первичная продукция, экосистемное дыхание, валовая продукция растительности, суммарный экосистемный обмен.

Болота представляют собой сложные природные послеледниковые системы, для которых характерно избыточное увлажнение, образование и накопление торфа [1]. Торфяные болотные экосистемы, как известно, представляют собой нетто-сток атмосферного CO_2 , в них углерод аккумулируется на десятки, сотни и тысячи лет. Роль континентальной биоты во флуктуациях концентрации атмосферного CO_2 до сих пор окончательно не ясна, но большинство специалистов считает, что биомасса и почвы служат нетто-стоком атмосферного углекислого газа. Пул органического углерода почв увеличивается в течение голоцена.

Климатические и гидрологические факторы оказывают наибольшее влияние на интенсивность потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах. Климатом обусловлена интенсивность

аккумуляции углерода и, следовательно, величина прироста растительности, а гидрологический режим определяет условия деструкции органики. Осушение болот способствует активизации в них биологической активности и ведет к увеличению эмиссии CO_2 и снижению выделения метана. Однако при интенсивном осушении и значительном снижении уровня грунтовых вод продуцирование CO_2 снижается, уменьшается и его эмиссия.

Территория исследования

Работы по исследованиям потоков парниковых газов проводились на территории Салымской группы месторождений (СГМ), разрабатываемая компанией «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.» (СПД) расположенной в Нефтеюганском районе Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Растительный

покров бассейна р. Салым в пределах лицензионных участков СГМ площадью 1484 км² представлен в основном лесными (712 км²) и болотными (770 км²) экосистемами [2]. Нарушенная растительность (вырубки, просеки) занимает незначительные площади (2 км²).

Болота на территории СГМ распространены столь же широко как зональная лесная растительность и отличаются большим фитоценотическим разнообразием. По типу водно-минерального питания болотные сообщества относятся к трем типам олиготрофной, мезотрофной и эвтрофной растительности, соответствующей верховым (409 км²), переходным (130 км²) и низинным (231 км²) болотам. В зависимости от степени обводненности болотных местообитаний и степени выраженности древесного яруса, болотные сообщества относят к древесной, древесно-моховой, древесно-травяной или моховой группе [3].

Измерения потоков углекислого газа проводились в период с 7 по 14 июля 2019 г. в шести пунктах исследований, расположенных на территории типичных болотных экосистем эвтрофного, мезотрофного и олиготрофного типов с учетом разнообразия микроландшафтов, а именно на олиготрофной мочажине на ГМК (П-1), олиготрофной гряде на ГМК (П-2), просеке по низкому рямю под ЛЭП (П-4), сосново-кустарничково-сфагновом болоте (низкий рям) (П-5), берёзовое эвтрофном болоте (П-7), открытой вахтово-сфагновой мезотрофной топи (П-8).

Автоматические измерения потока CO₂ проводились с помощью системы почвенного дыхания Licor LI-8100A в составе: блок газоанализатора LI-8100, автоматическая камера LI-8100–104C, блок питания LI-8150–770, почвенные основания, блок внешних датчиков. Почвенное основание аккуратно врезалось в моховую дернину, на нее помещалась автоматическая прозрачная камера LI-8100–104C, которая присоединялась к газоанализатору, размещенному на деревянных мостках (трап 2 м х 0.5 м). Питание автоматической системы осуществлялось от автомобильного аккумулятора, а на расстоянии 50–70 м размещался бензогенератор, работающий круглосуточно. Система работала автономно без участия оператора в течение 4–24 часов. После продолжительной серии измерений в одном наблюдательном пункте, оборудование демонтировалось и переносилось в следующий пункт. Прозрачная камера (объемом 4076.1 см³ с площадью основания 317.8 см²) закрывалась каждые 20 минут на 4 минуты, в течение которых каждую секунду записывались данные о концентрации CO₂ в камере. Результаты измерений обрабатывались в специализированном программном обеспечении LI-8100 File Viewer 3.1.0.

Для каждого измерения для расчёта потока CO₂ брался интервал времени, в течение которого концентрация изменяется линейно.

Как правило, в светлое время суток преобладает поглощение CO₂ растительностью и потоки принимают отрицательные значения. Ночью – поток CO₂ положительный, то есть происходит эмиссия углекислого газа из экосистемы в атмосферу. В пункте наблюдений под просекой ЛЭП (П-4) отрицательные потоки CO₂ не были зарегистрированы, поскольку измерения проводились на двух участках, лишенных растительности.

Временная вариабельность значений потоков CO₂ очень велика, поскольку результирующий суммарный экосистемный обмен формируется в результате взаимодействия потоков эмиссии углекислого газа почвой и растениями, а также ассимиляции CO₂ фотосинтезирующими частями растений на свету. Экосистемное дыхание и фотоассимиляция управляются множеством параметров, основными из которых являются приходящая фотосинтетически активная солнечная радиация, температура и влажность воздуха, а также уровень болотных вод.

Корректная интерпретация результатов измерений возможна только при использовании балансовых математических моделей, описывающих основные стоки и источники углекислого газа в экосистеме, учитывающих изменения управляющих параметров.

Математическая модель потоков CO₂

Для распространения полученных данных наблюдений на другие периоды исследований и рассчитать годовой углеродный баланс экосистемы, была предложена модель общего обмена экосистем [4]. Измеренный общий обмен (NEE) был разделен на входящий (GPP) и расходный (ER) компоненты:

$$NEE = ER + GPP; \quad (1)$$

$$GPP = LAI \times f_{PAR}; \quad (2)$$

$$ER = HR + AR = f_T + LAI \times f_P \quad (3)$$

где LAI – удельная площадь листовой поверхности (leaf area index), характеризующая изменение фотосинтезирующей биомассы растительности в течение сезона, AR – автотрофное дыхание или эмиссия CO₂ почвенными микроорганизмами, HR – гетеротрофное дыхание или дыхание растений. Для моделирования светового отклика поглощения углерода растительностью f_{PAR} в дневное время была использована гиперболическая функция

$$f_{PAR} = \alpha \times PAR \times G_m / (\alpha \times PAR + G_m), \quad (4)$$

где α – начальный наклон кривой светового отклика при слабом освещении (эффективность фотосин-

теза), G_m – теоретическая максимальная скорость фотосинтеза при бесконечной PAR (способность фотосинтеза).

Общее дыхание экосистемы моделировалось с использованием экспоненциального уравнения, широко используемого для объяснения вариаций ER.

$$f_T = E_0 \times \exp(k_T \times T_a); \quad (5)$$

где T_a – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), E_0 – базовое экосистемное дыхание при $T_a=0$, k_T – коэффициент чувствительности дыхания к температуре.

Для воспроизведения сезонного роста растений и их отмирания использована модель LAI. В течение первой половины лета, точнее с начала вегетационного сезона в мае до середины периода вегетации в июле, зеленая фитомасса увеличивается пропорционально поглощаемому количеству углекислого газа

$$LAI_1 = LAI_0 + NEE / L_1. \quad (6)$$

После достижения максимума, фитомасса изменяется по закону

$$LAI_1 = LAI_0 + NEE / L_1 - dT_{10} \cdot (LAI_0 - L_0) / L_2, \quad (7)$$

где LAI_0 – индекс листовой поверхности на предыдущем временном шаге, L_0 – LAI в начале вегетационного сезона, L_1 и L_2 – параметры модели,

$dT_{10} = (100 - 9.9 \times T_a)$ – отклонение температуры от температуры ниже 10°C , при $T_a > 10^{\circ}\text{C}$, $dT_{10} = 1$. Кроме того в уравнениях используется значение NPP_0 – количество углекислого газа, поглощенное растениями на предыдущем временном шаге.

$$NPP = AR + GPP = LAI \times f_T + LAI \times f_{PAR}. \quad (8)$$

В этом исследовании NEE является отрицательным, когда значение GPP превышает значение ER и происходит удаление углекислого газа из атмосферы. NEE является положительным, когда значение ER превышает значение GPP и углекислый газ выделяется из экосистемы в атмосферу.

Модель была откалибрована в соответствии с натурными измерениями потоков углекислого газа. Для каждого пункта наблюдений определены шесть параметров: два параметра для модели фотосинтеза (α , G_m) два параметра для модели дыхания (E_0 , k_T) и два – для модели роста биомассы (L_1 , L_2). Процедура многократной оптимизации была выполнена в программном обеспечении MATLAB с использованием функции *fminsearch*. Минимум неограниченной функции многих переменных найден методом без производных. Среднеквадратичная ошибка была использована в качестве минимизирующей функции.

Таблица 1 – Параметры модели (1–8) для исследованных экосистем.

	Мочажина на ГМК	Гряда на ГМК	Низкий рям	Открытая транзитная мезотрофная топь	Осоково-березовое эвтрофное болото
α	1.64	1.01	1.40	3.51	3.50
G_m	255.6	434.3	853.3	424.8	315.9
E_0	17.3	20.1	68.3	41.5	36.7
k_T	0.060	0.060	0.053	0.024	0.064
L_1	834 137	350 118	740 106	350 143	95 207
L_2	3 024	4 068	5 107	3 084	6 114
LAI_1	1.81	1.63	2.73	1.62	1.52
LAI_2	2.06	2.41	3.18	3.12	4.03

Параметры модели (1–8) для исследуемых экосистем существенно различаются. Так, эффективность фотосинтеза (параметр α) для олиготрофных болот варьирует от 1,01 до 1,64, а для мезотрофной топи и эвтрофного болота имеет значения в 2–3 раза больше, вероятно из-за большой доли трав и осоки в составе растительного покрова. Коэффициент линейной корреляции Пирсона (r) между α и запасами фотосинтезирующей биомассы составляет 0,82. Теоретическая максимальная способность фотосинтеза (параметр G_m) не имеет значимую корреляционную связь ($r = 0.89$) только с величиной LAI в начале вегетационного сезона. Базовое экосистем-

ное дыхание (параметр E_0) зависит от величин LAI в начале и середине сезона, однако связь статистически не значима. Коэффициент температурной чувствительности k_T для всех болот имеет близкие значения. Немного меньшая чувствительность эмиссии к температуре получена для мезотрофной топи.

Кроме того, для расчета задается начальное значение LAI_1 , принятое равным суммарному LAI для мхов и зеленых листьев кустарничков прошлого года. Предполагаем, что это значение в середине сезона соответствует значению в начале вегетационного сезона. Начальная точка расчета была выбрана 1 мая. Параметр L_1 подобран из условия

наилучшего совпадения модельного и расчетного индексов LAI_2 на момент проведения экспедиционных наблюдений (8–13 июля). Параметр L_2 подобран таким образом, что к концу вегетационного сезона (20 сентября) LAI снижается до значений в начале вегетационного сезона LAI_1 . Предлагаемая модель LAI качественно воспроизводит сезонный ход биомассы и позволяет экстраполировать полученные данные на весь вегетационный сезон с меньше ошибкой, чем попытки экстраполяции без модели (6–7). Наибольший сезонный ход LAI наблюдается для эвтрофного осоково-березового болота, характеризующегося большими запасами биомассы в листьях растений и небольшим количеством мхов. Так же значительный рост LAI , вызванный накоплением биомассы зеленых трав (осоки и вахты) отмечается на мезотрофной осоково-вахтовой топи. В ряме, гряде и мочажине ГМК сезонные вариации LAI не превышают 1.

Наземные наблюдения за интенсивностью потоков CO_2 с поверхности, проводимые камерным методом не позволяют оценить роль древесного яруса в поглощении углекислого газа. Однако, зависимости интенсивности фотосинтеза и дыхания растений от характеристик окружающей среды для деревьев имеют тот же вид, что и для других зеленых растений. Поэтому, предлагаемая модель может быть использована для расчета потоков CO_2 в древесном ярусе на облесенных болотах. Результаты расчетов сезонного хода LAI показывают незначительное увеличение площади поверхности хвои в течение лета и затем ее снижение осенью. Древесная биомасса в данной модели не учитывается и считается постоянным инертным пулом.

Результаты модельных расчетов

Для определения характеристик суммарного экосистемного обмена по модели (1–8) использовались данные о температуре воздуха и количестве приходящей солнечной радиации Мухрино за период с 1 мая по 1 октября 2019 г. Параметры модели для каждой болотной экосистемы приведены в таблице 1. В результате расчетов получены временные ряды потоков поглощения углекислого газа растительностью в процессе фотосинтеза (GPP), выделения CO_2 в процессе экосистемного дыхания (ER) и результирующий поток – суммарный экосистемный обмен (NEE). В годовом ходе увеличение GPP в дневные часы связано как с годовым ходом солнечной радиации, так и с накоплением биомассы растений в процессе фотосинтеза. Эмиссия CO_2 из экосистемы контролируется температурой воздуха и увеличивается от весны к середине лета вслед за ростом температуры. В середине июля в период с аномально

жаркой погодой потоки экосистемного дыхания резко увеличиваются, что проявляется и в уменьшении величины суммарного экосистемного обмена.

Наибольшая вариабельность экосистемного дыхания и максимальные эмиссионные потоки в середине лета наблюдаются для низкого ряма, осоково-березового эвтрофного болота и древесных остатков на просеке. Средние суточные значения потоков углекислого газа для остальных болотных экосистем не превышают $380 \text{ мг/м}^2/\text{ч}$. Наименьшие потоки поглощения CO_2 в процессе фотосинтеза получены для болотных экосистем с наименьшими запасами растительности – гряды и мочажины ГМК. В остальных болотах интенсивность фотосинтеза возрастает к середине лета, после чего постепенно снижается.

Суммарный экосистемный обмен варьирует сильнее, чем его составляющие. NEE для экосистем без растительного покрова всегда положительный. Для мочажины ГМК и открытой транзитной мезотрофной топи в любой день вегетационного периода NEE отрицательный. Для остальных экосистем наблюдаются как положительные, так и отрицательные средние суточные значения потоков.

Наибольший поток экосистемного дыхания (2197 г/м^2) получен для низкого ряма, с учетом древесного яруса. Выделение CO_2 в атмосферу в процессе автотрофного и гетеротрофного дыхания на осоково-березовом болоте и с поверхности древесных остатков почти в два раза ниже, чем на низком ряме. Наименьшая эмиссия наблюдается на мочажине ГМК (441.6 г/м^2) и с поверхности обнаженного торфа (322.4 г/м^2).

Суммарный экосистемный обмен за вегетационный период для всех ненарушенных болотных экосистем отрицательный, что свидетельствует об устойчивом стоке атмосферного углерода. Наибольшая интенсивность стока (1062 г/м^2) получена для открытой транзитной мезотрофной топи с хорошо развитым травяным покровом и большими годовыми приростами мхов. Несколько меньшие значения суммарного экосистемного обмена (603.1 г/м^2) получены для низкого ряма, где несмотря на высокую интенсивность поглощения CO_2 растительностью, так же велик поток выделения углекислого газа в атмосферу ($1094,8 \text{ г/м}^2$), вследствие разложения растительных остатков в аэрируемом слое торфяной залежи.

Заключение

Обобщение результатов экспедиционных исследований позволило получить оценки потоков углекислого газа в болотных экосистемах исследуемой территории. Результаты кратковременных локальных

измерений потоков парниковых газов с помощью математических моделей были экстраполированы на вегетационный период и на другие типы болотных экосистем. Суммарный экосистемный обмен формируется как разность фотосинтетической ассимиляции углекислого газа растениями и эмиссии CO_2 в процессе дыхания растений и микроорганизмов. Болотные экосистемы с большими запасами биомассы, в том числе и в древесном ярусе, имеют значительные потоки (более $1500 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$) связанные с фотосинтезом, однако в них же велика и расходная составляющая углеродного обмена ($750\text{--}2200 \text{ г/м}^2$). В результате получено, что наибольшее итоговое поглощение угле-

кислого газа наблюдается на мезотрофной осоково-вахтовой топи (1062 г/м^2) и в низком ряме, с учетом древесного яруса (603 г/м^2). Остальные болота накапливают $244\text{--}466 \text{ г/м}^2$ из атмосферы в течение вегетационного сезона.

Работа выполнена при поддержке компании Салым-Петролеум Девелопемент Н.В. в рамках НИР «Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными и лесными экосистемами на территории лицензионных участков Салымской группы месторождений» по договору № MOS/19/0053 (SAP PO 45134027001).

Список литературы

1. Лисс О.Л., Березина Н.А. Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 208 с.
2. Отчет по НИР № MOS/13/0035 «Инвентаризация биоразнообразия и создание природоохранной карты на территорию Салымской группы месторождений». Ханты-Мансийск, ЮГУ. 2015. Т. 1. – 141 с.
3. Шепелева Л.Ф., Обухова Ю.Н., Самойленко З.А., Волегова Е.А. Болотная растительность бассейна реки Большой Салым // Сб. научн. трудов биол. фак-та Сург. гос. ун-та. Вып. 4. Сургут: Изд-во СурГУ, 2008. С. 45–58.
4. Dyukarev E.A. Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.

MODELING OF THE SEASONAL COURSE OF CARBON EXCHANGE IN WETLAND ECOSYSTEMS

E. A. Dyukarev^{1,2}

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System of the Siberian Branch
Russian Academy of Sciences, 10/3 Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russia

²Yugra State University, 16 Chekhov st., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia
dekot@mail.ru

Abstract. The paper summarizes the results of expeditionary studies to study biological productivity, carbon dioxide fluxes in the bog ecosystems of the Central Taiga of Western Siberia. The paper summarizes the results of expeditionary studies to study biological productivity, carbon dioxide fluxes in the bog ecosystems of the Central Taiga of Western Siberia. Measurements of carbon dioxide fluxes were carried out from July 7 to July 14, 2019 at six observation sites located on the territory of typical wetland ecosystems of eutrophic, mesotrophic and oligotrophic types, taking into account the diversity of microlandscapes. Automatic measurements of the CO₂ fluxes were carried out using the Licor LI-8100A soil respiration system.

To extend the obtained observation data to other periods and to calculate the annual carbon balance of the ecosystem, a net ecosystem exchange (NEE) model was proposed, and the net fluxes of greenhouse gases for the growing season were calculated. The model uses air temperature and incoming photosynthetically active radiation as explanatory factors for gross primary production and ecosystem respiration. The model was calibrated in accordance with field measurements of carbon dioxide fluxes. For each observation site, six parameters were determined: two parameters for the photosynthesis model, two parameters for the respiration model and two for the biomass growth model. As a result of calculations for the period from May to October 2019, time series of fluxes of carbon dioxide absorption by vegetation during photosynthesis, CO₂ release during ecosystem respiration, and the resulting flux – net ecosystem exchange were obtained. In the annual course, an increase in the intensity of photosynthesis during the daytime is associated with both the annual course of solar radiation and the accumulation of plant biomass. It was found that the net ecosystem exchange varies more strongly than its components. The NEE for ecosystems without vegetation is always positive. NEE is negative for the hollow and the open transit mesotrophic fen on any day of the growing season. Other ecosystems show both positive and negative daily mean fluxes.

Wetland ecosystems with large biomass storages have significant fluxes (more than 1500 g CO₂ / m²) associated with photosynthesis, but they also have a large expenditure component of carbon exchange (750–2200 g / m²). As a result, it was found that the greatest total absorption of carbon dioxide is observed in the mesotrophic sedge- menyanthes fen (1062 g / m²) and in the low ryam, taking into account the tree layer (603 g / m²). Other wetlands accumulate 244–466 g / m² from the atmosphere during the growing season.

Keywords: carbon balance, carbon dioxide, mathematical modeling, net primary production, ecosystem respiration, gross vegetation production, net ecosystem exchange.

References

1. Liss O.L., Berezina N.A. Wetlands of the West Siberian Plain. Moscow: Nauka, 1981. 208 p. (In Russian)
2. Research report № MOS / 13/0035 "Inventory of biodiversity and creation of an environmental map for the territory of the Salym group of fields". Khanty-Mansiysk, South State University. 2015. Vol. 1. – 141 p. (In Russian)
3. Shepeleva L.F., Obukhova Yu.N., Samoilenko Z.A., Volegova E.A. Swamp vegetation of the Bolshoi Salym river basin // Coll. scientific. works of biol. fact-that Surg. state un-that. Issue 4. Surgut: Publishing house of SURSU, 2008. P.45–58. (In Russian)
4. Dyukarev E.A. Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites // Agricultural and Forest Meteorology. 2017.doi: 10.1016 / j.agrformet.2017.03.011.