

## Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири

А. В. НАУМОВ, Н. П. КОСЫХ, Н. П. МИРОНЫЧЕВА-ТОКАРЕВА, Е. К. ПАРШИНА

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18

### АННОТАЦИЯ

Изучены компоненты и процессы углеродного цикла северных болот Западной Сибири. Рассмотрены особенности функционирования углеродного цикла болот в контрастных условиях средней тайги и лесотундры. Обсуждаются вопросы функционального состояния северных болот в связи с современным климатическим трендом.

Западная Сибирь по своему географическому положению занимает особое место, располагаясь в центральной части евразийского континента. Ее площадь составляет почти 3 млн км<sup>2</sup>. В геологической истории страны преобладали процессы аккумуляции рыхлых отложений, которые постепенно нивелировали неровности фундамента. Относительно плоский рельеф и повышенное количество осадков способствовали широкому развитию процесса заболачивания территории. Протяженность Западно-Сибирской равнины с юга на север почти на 2500 км определяет большое разнообразие природных условий. В современном облике страны принято выделять пять ландшафтных зон: тундровую, лесотундровую, лесоболотную, лесостепную и степную. Степень заболоченности земной поверхности в разных зонах достигает 30–50 %.

Под влиянием современного климатического тренда природные ландшафты северных районов Западной Сибири постепенно трансформируются. Этот процесс, проявляющийся в деградации многолетней мерзлоты, распространяется на обширные болотные массивы субарктической зоны. По этой причине исследования функционального состо-

яния северных болотных экосистем приобретают сегодня особую актуальность.

Существует мнение, что оттаивание мерзлых торфяных болот способно высвободить в атмосферу огромное количество метана, усиливая тем самым парниковый эффект [1]. Необходимо отметить, что исследования эмиссии парниковых газов из болот Западной Сибири немногочисленны. Однако измерения, выполненные одним из авторов настоящей статьи на мерзлых и протаивающих болотах северной тайги, не подтверждают гипотезу о сверхвысоких потоках метана в результате деградации мерзлоты [2]. Очевидно, этот процесс имеет стохастический характер и не может быть надежно зарегистрирован точечным камерным методом. Использование дистанционных методов, охватывающих значительные по площади труднодоступные северные территории Западной Сибири, весьма привлекательно для решения таких задач.

В данной публикации рассматриваются в сравнительном аспекте результаты полевых наземных исследований компонентов и процессов углеродного цикла болотных экосистем лесотундровой и лесоболотной зон Запад-

ной Сибири. Считается, что торфяные болота – природные объекты с положительным углеродным балансом. Действительно, накопленные в течение голоцена торфяные отложения являются ярким свидетельством эффективности аккумулятивного процесса. Однако в некоторых публикациях имеются достоверные данные, характеризующие верховые сфагновые болота как источник углекислого газа, поступающего в атмосферу [3, 4]. Можно предположить, что современные верховые болота достигли в своем развитии такого состояния, когда небольшие климатические изменения легко могут изменить их углеродный статус. Рассмотрим особенности углеродного баланса на контрастных примерах функционирования сфагновых болот.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на двух ключевых участках, расположенных в лесотундре (ЛТ) и средней тайге (СТ). Выбор объектов определялся контрастностью условий формирования и функционирования болотных массивов, наиболее характерных для каждой ландшафтной зоны. Решающим фактором считали наличие и/или отсутствие многолетней мерзлоты в торфяной толще, так как потепление климата уже сейчас оказывает существенное влияние на Субарктику [5]. Выбранные объекты в данной публикации условно названы северными болотами, к которым мы относим объекты, расположенные севернее шестидесятой параллели. Они существенно отличаются ландшафтным обликом, составом доминирующих видов в кустарничково-травяном и моховом ярусах по сравнению с большей частью болот Васюганской провинции [6, 7].

Первый ключевой участок (ЛТ) находился на водоразделе рек Надым и Ныда, в 20 км восточнее населенного пункта Пангоды (65°52' N, 74°58' E). Исследованный болотный массив представлял собой типичное плоскобугристое болото с характерной кустарничково-лишайниковой растительностью (*Ledum decumbens* (Ait.) Lodd. ex Steud., *Betula nana* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Cladina rangiferina* (L.) Harm. и *C. stellaris* (Opiz.) Brodo) на мерзлых буграх (МБ) и осоково-сфагновыми оли-

готрофными сообществами мочажин (МЧ) в понижениях микрорельефа (*Carex rotundata* Wahlenb., *Sphagnum balticum* (Russ.) Russ. ex C. Jens., *Sphagnum jensenii* H. Lindb.). Мощность торфяного горизонта на буграх составляла 50–60 см и 60–80 см – в мочажинах, которые за летний период успевали полностью оттаять до минерального основания в своей центральной части. Соотношение бугров и мочажин по занимаемой площади составляло примерно 1 : 1–1,5 : 1.

Второй ключевой участок (СТ) располагался на междуречье Оби и Иртыша в 65 км восточнее г. Ханты-Мансийска (60°59' N, 70°10' E) и отличался большим разнообразием болотных экосистем и отсутствием многолетней мерзлоты. Выбранный болотный массив относится к типу верховых, олиготрофных сфагновых болот [8, 9]. В его фациальной структуре выделены: сосново-кустарничково-сфагновый биогеоценоз – рям (*Pinus sylvestris* L., *Ledum palustre* L., *Andromeda polifolia* L., *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr.), грядово-мочажинный комплекс с разнотравно-кустарничково-сфагновым сообществом на грядах (*Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench., *Oxyccocus microcarpus* Turcz. ex Rupr., *Sphagnum fuscum*) и олиготрофными осоково-сфагновыми мочажинами МЧ (*Carex limosa* L., *Sphagnum lindbergii* Schimp. ex Lindb., *S. balticum*), мезотрофные проточные топи (*Carex rostrata* Stokes., *Eriophorum polystachyon* L., *Sphagnum fallax* (Klinggr.) Klinggr., *S. majus* (Russ.) C. Jens., *S. papillosum* Lindb.) в соотношении занимаемых площадей 5 : 1 : 3 : 1 соответственно. Мощность торфяного горизонта в мочажинах составляла 130–150 см и более 6 м – в исследованной топяной экосистеме.

Полевые исследования проводились в 2004–2006 гг. Газовые потоки измеряли методом замкнутых камер ( $V = 60,85$  л и высота 40 см) при естественном освещении (нетто-ассимиляция) и в темноте (эмиссия). Для затемнения камер использовали чехлы с отражающим защитным слоем из алюминиевой фольги. Время экспозиции в темных камерах составляло 28 мин. Из внутреннего объема камер отбирали четыре пробы воздуха с интервалом 7 мин. Содержание углекислого газа и метана в пробах определяли на газовом хро-

мамографе “Кристалл 5000” (СКБ “Хроматек”, Россия) по стандартной методике. В расчетах скорости эмиссии использовалась линейная зависимость накопления газа внутри камеры от времени. Все измерения на ключевом участке СТ проводились в летнее время – с июня по сентябрь. Наблюдения за газообменом на ключевом участке ЛТ проведены в июле и августе 2005 г.

Нетто-ассимиляцию оценивали на основании экспериментальных зависимостей скорости поглощения углекислого газа внутри камеры от интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) и динамики уровня ФАР в течение летнего периода. Разные условия освещенности в модельных опытах создавали с помощью экрана из одного и/или двух слоев капроновой сетки. Концентрацию углекислого газа внутри камеры регистрировали портативным газоанализатором EGM-4 (PP-System, UK). Продолжительность измерения при каждом уровне ФАР составляла 2 мин. После этого камеру открывали и проветривали.

Надземную фитомассу учитывали во второй половине августа на 5–6 пробных площадках размером 40 × 40 см в каждой экосистеме. Свежие растительные пробы сортировали в лаборатории на фракции: зеленые листья трав, кустарников и кустарничков, многолетние побеги и прирост текущего года. Для определения запасов мхов и лишайников, а также подземных органов растений на тех же площадках отбирали пробы размером 10 × 10 × 10 см, начиная от поверхности сфагнума (лишайника) до глубины 30 см, которые также разбирали на фракции, выделяя верхнюю, хорошо пигментированную часть мхов и лишайников, узлы кушения, корни, корневища трав, кустарников и кустарничков. Скрытые в моховом (лишайниковом) слое нижние части побегов относили к надземной фитомассе. Древесный ярус не учитывали. Растительный материал высушивали до постоянной массы при 80 °С и взвешивали.

Чистую первичную продукцию (NPP) определяли отдельно по каждому компоненту и суммировали. Надземную продукцию трав принимали равной максимальному запасу их зеленой фитомассы. У кустарников и кустарничков годовую надземную продукцию определяли по величине совокупного прироста

побегов с листьями в текущем году. Продукцию мхов оценивали по величине годового линейного прироста и количеству стебельков на пробных площадках 100 см<sup>2</sup>. Продукция лишайников принята равной среднему годовому приросту фитомассы за 5 последних лет (по числу колен). Подземную продукцию трав, кустарников и кустарничков определяли по годовому приросту разных функциональных групп корней, корневищ и узлов кушения [10].

Деструкцию разных растительных фракций изучали в полевых условиях, закладывая предварительно собранный, высушенный материал в мешочках из капроновой сетки в торф на глубину 5, 15 и 25 см и на поверхность мохового слоя. Скорость разложения рассчитывали по убыли массы контрольных проб после годовой экспозиции. Общие потери углерода при разложении отмирающей фитомассы для разных болотных экосистем представлены суммарно по всем фракциям с учетом соответствующих коэффициентов разложения. Предполагалось, что болота находятся в динамическом равновесии и созданная годовая продукция равна величине ежегодно отмирающей фитомассы.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия вегетационного сезона считаются важным фактором, оказывающим влияние на функциональное состояние растительного покрова. В годы исследования летние температуры воздуха различались сравнительно мало (рис. 1). Однако за счет более раннего перехода среднемесячной температуры через ноль весной и более позднего – осенью продолжительность теплого периода в 2005 г. для ключевого участка СТ оказалась почти на 50 дней больше по сравнению с 2004 и 2006 гг. Несмотря на это, количество осадков за период с мая по сентябрь (по данным метеостанции г. Ханты-Мансийска) составило в 2004 и 2005 гг. 210 и 222 мм соответственно. Более продолжительным оказался теплый период 2005 г. и в лесотундровой зоне (Тарко-Сале). В начале 2006 г. (январь – февраль) аномально низкие температуры воздуха зарегистрированы во многих областях Западной Сибири.

Несмотря на сходство растительности ключевых участков (микрорельеф, ярусное строе-



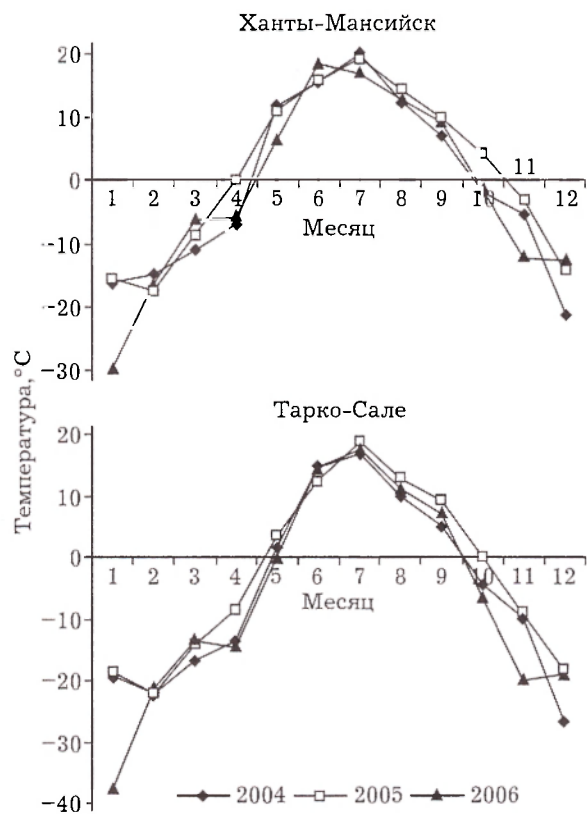


Рис. 1. Ход среднемесячной температуры воздуха в годы исследований (по данным метеостанций)

ние, жизненные формы, условия питания), выявлены важные количественные различия (рис. 2). Более суровые климатические условия в лесотундровой зоне и многолетняя мерзлота существенно ограничивали запасы живой фитомассы и общий продукционный потенциал болот. Так, чистая первичная продукция варьировала от 294 до 588 г С/(м<sup>2</sup> · год) и от 116 до 256 г С/(м<sup>2</sup> · год) в разных экосистемах в период исследований на ключевых участках СТ и ЛТ соответственно. При этом продукция топяных экосистем и гряд болотного массива в условиях средней тайги мало менялась по годам. Более динамичными оказались осоково-сфагновые олиготрофные мочажины, годовая продукция которых увеличилась за 2004–2006 гг. почти в 2 раза. Также отличались высокой изменчивостью общего запаса фитомассы и чистой первичной продукции мерзлые болота лесотундровой зоны. Однако более продолжительный теплый период 2005 г. не оказал стимулирующего влияния ни на общий запас, ни на NPP большинства экосистем СТ и ЛТ.

В структуре фитомассы сообществ наиболее дренированных участков болотного мас-

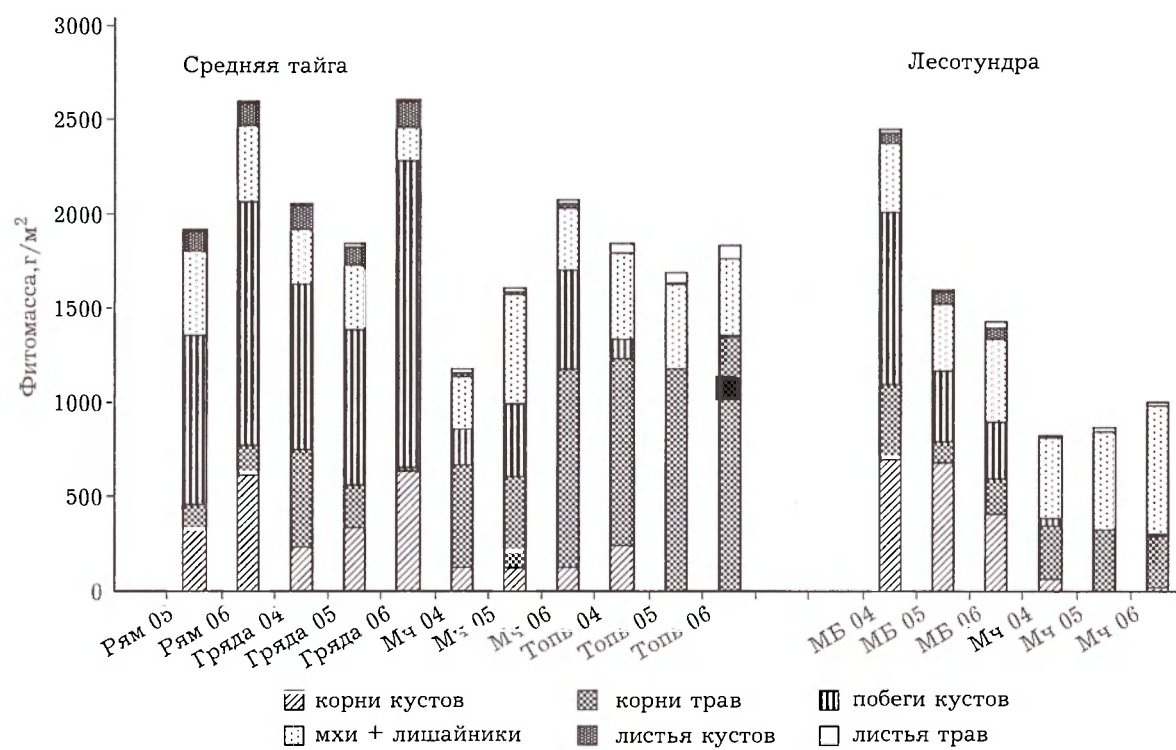


Рис. 2. Структура фитомассы растительного покрова ключевых участков

сива СТ (рям и узкие гряды) преобладали побеги кустарников и кустарничков, а осоково-сфагновых мочажин и топей – корни трав, преимущественно осок (см. рис. 2). На мерзлых буграх ЛТ соотношение побегов и подземных органов кустарников и кустарничков выравнивается. В олиготрофных мочажинах более половины запасов живой фитомассы составляют сфагновые мхи.

Важным показателем направленности процессов углеродного цикла является соотношение гетеротрофного (подземные органы) и автотрофного (зеленая фитомасса) компонентов. Это соотношение на СТ самым низким было в 2005 г. (рям, гряда, мочажина) – 0,8–1,2. По-видимому, более длительный теплый период способствовал росту и развитию листового аппарата трав и кустарничков и разрастанию сфагнов. Для болот ЛТ такая закономерность в годы исследований не выявлена.

Характерные соотношения слагаемых чистой первичной продукции болотных фаций ключевых участков СТ и ЛТ показаны в табл. 1. Наиболее продуктивными являются осоково-сфагновые проточные топи, которые занимали не более 10 % площади ключевого участка. Соотношение NPP мхов и трав в этих экосистемах составляло 1 : 3. Грядово-мочажинный комплекс занимает промежуточное положение по величине чистой первичной продукции. Рям – сосново-кустарничково-сфагновый биогеоценоз – оказался наименее продуктивным (без учета древесного яруса) среди изученных структурных элементов

СТ. Мерзлые бугры и мочажина ключевого участка ЛТ характеризовались значительно более низкими величинами NPP по сравнению с болотами средней тайги. Существенно различались олиготрофные мочажина ЛТ и СТ по соотношению продукции мхов и трав (1 : 1 и 2 : 1 соответственно).

Сфагновые мхи являются постоянным компонентом верховых болот Западной Сибири. В связи с этим представлял интерес анализ эффективности продукционного процесса сфагнов в контрастных условиях существования. Выбранные ключевые участки болотных массивов в средней тайге и лесотундре соответствуют критерию контрастности для выявления существенных различий продукционного потенциала сфагнового покрова. В качестве показателя эффективности образования чистой первичной продукции исследовали взаимосвязь годичного прироста сфагнов от величины запаса фотосинтетически активной (пигментированной) фитомассы (рис. 3). Результаты регрессионного анализа не выявили статистически значимых различий в эффективности работы ассимиляционного аппарата сфагновых мхов в условиях средней тайги и лесотундры. Коэффициент эффективности продукционного процесса сфагнов (продукция/запас) оказался равным 0,5 в разных биоклиматических зонах. Таким образом, на верховых болотах северных провинций Западной Сибири обновление сфагнового покрова происходит примерно за 2 года, что можно рассматривать как один из факторов устойчивости экосистемы.

Т а б л и ц а 1  
Первичная продуктивность болотных фаций (среднее ± ошибка среднего) в 2005 г., г С/(м<sup>2</sup> · год)

Компонент	Средняя тайга				Лесотундра	
	Рям	Гряда	Мочажина	Топь	Бугор	Мочажина
Травы:	33	82	93	433	28	97
листья	6 ± 2	14 ± 2	11 ± 2	29 ± 2	3 ± 2	8 ± 1
корни	27 ± 16	69 ± 22	82 ± 7	404 ± 114	25 ± 6	89 ± 17
Кустарнички:	145	185	43	3	62	–
побеги	28 ± 11	33 ± 5	5 ± 1	3 ± 2	21 ± 7	–
корни	117 ± 11	152 ± 8	38 ± 16	0	41 ± 18	–
Мхи	117 ± 2	102 ± 13	194 ± 7	145 ± 14	9 ± 10	109 ± 12
Лишайники	–	–	–	–	17 ± 2	–
Всего	295	369	330	581	116	206

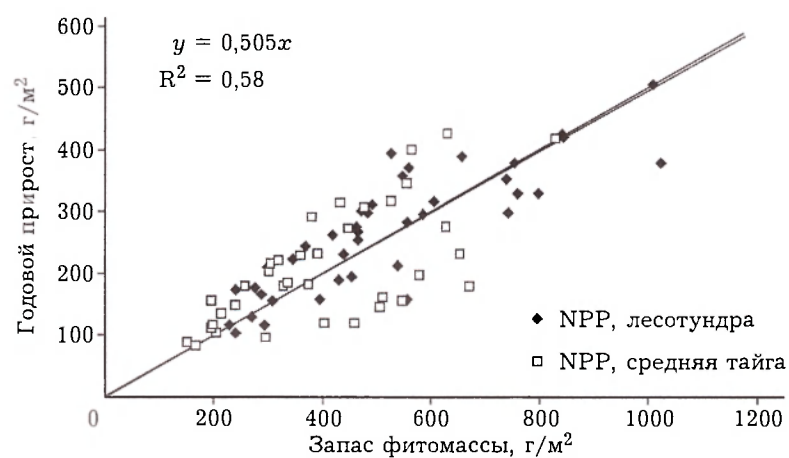


Рис. 3. Соотношение годового прироста и запаса живой фитомассы сфагновых мхов северных болот Западной Сибири

Газообмен является одним из важнейших процессов углеродного цикла болотных экосистем. Он включает ассимиляцию  $\text{CO}_2$  при фотосинтезе, дыхание растений, выделение углекислого газа и метана в процессе минерализации торфа, растительных и животных остатков. Другие процессы, приводящие к выделению или поглощению газов, в данной работе не рассматривались. Наиболее детальные измерения потоков углекислого газа и метана проведены в 2005 г. Усредненные оценки эмиссии с поверхности болот СТ и ЛТ представлены в табл. 2. Выделение метана вносит небольшой вклад в общую эмиссию углерода (R). Однако если принять во внимание двадцатикратный тепловой эффект от накопления в атмосфере метана по сравнению с углекислым газом, то роль северных болот в глобальной проблеме «парникового эффекта» не выглядит второстепенной. Наиболее высокой скоростью эмиссии  $\text{CH}_4$  характеризовались осокново-сфагновые топи и мочажины.

Общий поток углерода в атмосферу на СТ был в 1,5–2 раза выше, чем на ЛТ. По соотношению  $\text{NPP/R} = B$  можно выделить объекты с положительным и отрицательным балансом. Однако следует отметить, что экстраполяция данных, полученных в течение летних месяцев, на весь теплый период несколько завышает расходную статью. С другой стороны, отношение  $\text{NPP/R}$ , характеризующий общий баланс углерода в экосистеме, не учитывает потери углерода с болотными водами. Эти поправки имеют противоположный знак и взаимно компенсируют друг друга. Таким образом, показатель B представляет определенный интерес в качестве общей характеристики функционального состояния болотной экосистемы или болотного массива. Наиболее благоприятно складывался баланс углерода в мочажинах и топяных сообществах ( $B = 1,20-1,65$ ). Рям в средней тайге и мерзлые бугры в лесотундре характеризовались величинами B, меньшими единицы (0,62 и 0,65 соответственно), что указывает на возможные потери углерода этими экосистемами. Для более строгого вывода необходимы оценки дыхания растений. С учетом вклада корней

ношению  $\text{NPP/R} = B$  можно выделить объекты с положительным и отрицательным балансом. Однако следует отметить, что экстраполяция данных, полученных в течение летних месяцев, на весь теплый период несколько завышает расходную статью. С другой стороны, отношение  $\text{NPP/R}$ , характеризующий общий баланс углерода в экосистеме, не учитывает потери углерода с болотными водами. Эти поправки имеют противоположный знак и взаимно компенсируют друг друга. Таким образом, показатель B представляет определенный интерес в качестве общей характеристики функционального состояния болотной экосистемы или болотного массива. Наиболее благоприятно складывался баланс углерода в мочажинах и топяных сообществах ( $B = 1,20-1,65$ ). Рям в средней тайге и мерзлые бугры в лесотундре характеризовались величинами B, меньшими единицы (0,62 и 0,65 соответственно), что указывает на возможные потери углерода этими экосистемами. Для более строгого вывода необходимы оценки дыхания растений. С учетом вклада корней

Т а б л и ц а 2

Выделение углекислого газа и метана северными болотами Западной Сибири (среднее  $\pm$  ошибка среднего, в скобках – число измерений) в летний период 2005 г.,  $\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$

Поток	Средняя тайга			Лесотундра	
	Рям	Мочажина	Топь	Бугор	Мочажина
Метан	$11 \pm 3$ (21)	$136 \pm 23$ (34)	$92 \pm 9$ (33)	$6 \pm 1$ (22)	$31 \pm 2$ (23)
Двуокись углерода	$3183 \pm 271$ (24)	$1706 \pm 189$ (33)	$2254 \pm 183$ (33)	$1481 \pm 99$ (27)	$1253 \pm 233$ (16)
Общий поток	$3194 \pm 274$	$1842 \pm 212$	$2346 \pm 192$	$1487 \pm 100$	$1284 \pm 235$

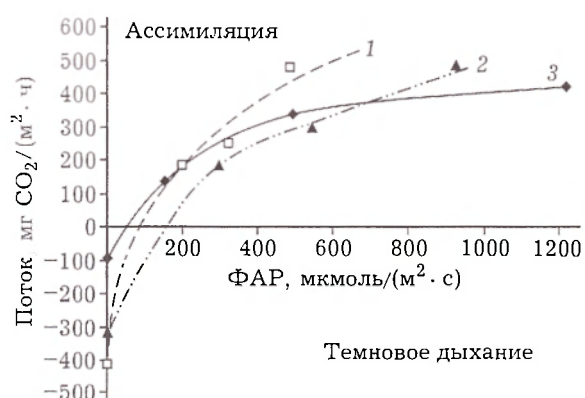


Рис. 4. Световые кривые ассимиляции  $\text{CO}_2$  болотной растительностью в условиях средней тайги: 1 – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (гряды), 2 – проточная осоково-сфагновая топь, 3 – осоково-сфагновый фитоценоз олиготрофной мочажины

деревьев в рябовом сообществе СТ показатель  $V = \text{NPP}/R$  увеличился лишь до 0,89. По-видимому, следует согласиться с выводом, что на повышенных, хорошо дренированных участках современных верховых болот имеет место замедление накопления торфа и увеличивается риск потерь углерода.

Приходная статья баланса определяется работой ассимиляционного аппарата растений. Основные характеристики фотосинтеза растительного покрова ключевых участков изучали в полевых экспериментах 2005 г. при разном уровне освещенности (рис. 4 и 5). Световой режим ключевых участков СТ и ЛТ в период наблюдений характеризовался близкими значениями ФАР. Максимальные зарегистрированные величины ФАР при ярком солнечном освещении не превышали  $2100 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Кустарничково-лишайниковый покров мерзлых бугров и осоково-сфагновые мочажины ключевого участка ЛТ имели практически одинаковые световые кривые ассимиляции  $\text{CO}_2$  при относительно низком уровне ФАР светового насыщения. Осоково-сфагновая растительность олиготрофных мочажин в условиях средней тайги также характеризовалась низким уровнем светового насыщения. Несколько иной вид световых кривых ассимиляции определен для растительного сообщества гряды и проточной топи. В диапазоне естественного изменения ФАР уровень светового насыщения этими объектами не был достигнут. Таким образом,

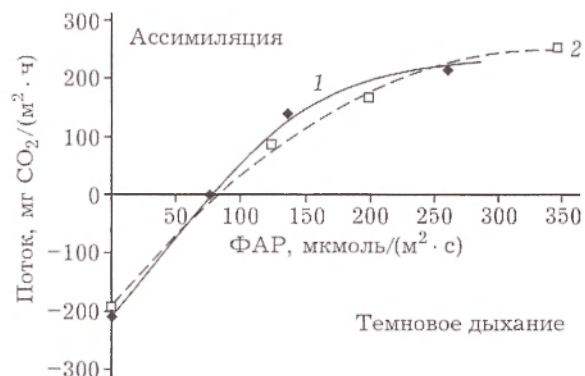


Рис. 5. Световые кривые ассимиляции  $\text{CO}_2$  растительностью болотных экосистем лесотундры: 1 – кустарничково-лишайниковое сообщество на мерзлых буграх, 2 – осоково-сфагновое сообщество олиготрофных мочажин

можно предположить, что углеродный обмен дренированных и влажных местообитаний верховых болот регулируется разными экологическими факторами.

В предположении о динамическом равновесии болотных экосистем допускается постоянство ряда функциональных характеристик объекта в многолетнем цикле. Количество ежегодно образующегося и отмирающего растительного вещества, общий запас фитомассы, соотношение автотрофных и гетеротрофных компонентов и некоторые другие характеристики таких экосистем остаются в некотором установившемся диапазоне в течение многих лет. Существование болот в относительно неизменном состоянии в течение сотен и даже тысяч лет может рассматриваться в большинстве случаев как устойчивое равновесие.

Очевидно, для поддержания равновесного состояния сформирован регуляторный механизм и установились определенные количественные соотношения между продукционным и деструкционным звеньями углеродного цикла. В ходе анализа результатов полевых экспериментов по разложению разных фракций растительного материала построена обобщенная регрессионная зависимость величины потерь углерода при разложении фитомассы от NPP (рис. 6). Выявленная степенная зависимость подтверждает наличие сильной функциональной связи между первичными продуцентами и деструкторами в болотных экосистемах. Таким образом, чем



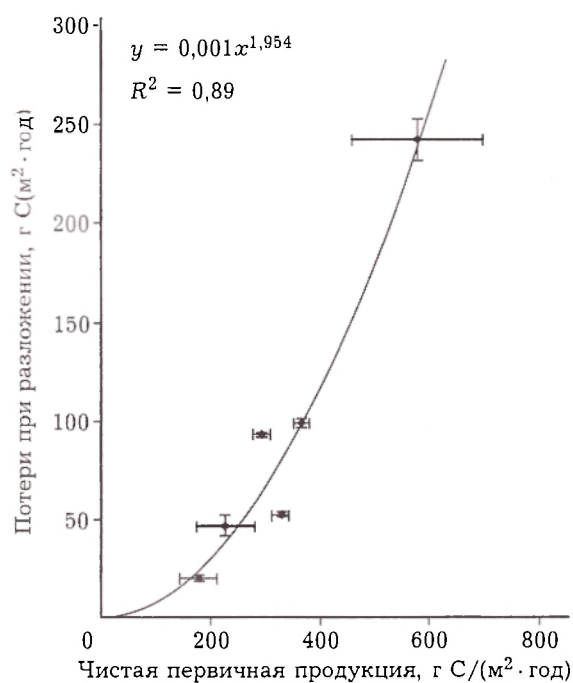


Рис. 6. Обобщенная регрессионная зависимость скорости разложения фитомассы от величины чистой первичной продукции северных болот Западной Сибири

выше чистая первичная продукция, тем больше потери углерода при разложении. По-видимому, ведущая роль в этом взаимодействии принадлежит фитоценозу, поставляющему питательный субстрат для жизнедеятельности микроорганизмов-деструкторов. Взаимосвязи между растениями и микроорганизмами в болотных экосистемах за многолетнюю историю существования болот тонко отрегулированы. Степенной характер зависимости, на наш взгляд, выражает закономерное распределение биомассы микроорганизмов-деструкторов в пределах ареала распространения верховых болот Западной Сибири и является важным фундаментальным свойством. Мы также надеемся, что дальнейшие

исследования в этой области дадут много новых экспериментальных точек для уточнения выявленной закономерности.

В исследованиях болот проблема углеродного баланса является самой острой и дискуссионной, что связано в первую очередь с недостатком экспериментальных данных и широким спектром вопросов, которые приходится рассматривать. К этому следует добавить, что многие интересные для работы объекты труднодоступны, а режимные измерения трудоемки. Другая причина — разные методы и подходы к оценке статей углеродного баланса. Одна из задач авторов настоящей публикации состояла в сравнении основных статей углеродного баланса, полученных разными методами. Использованы два подхода: прямое измерение газовых потоков камерным методом и комплексный учет изменения веса различных фракций растительного материала в годовом цикле. В табл. 3 представлены средневзвешенные оценки основных показателей углеродного баланса исследованных болот с учетом фациальной структуры болотных массивов.

Полученные результаты со всей определенностью доказывают, что более мягкие климатические условия средней тайги способствовали вовлечению в биологический круговорот значительно большего количества углерода по сравнению с лесотундрой. Абсолютно все показатели углеродного баланса болотного массива СТ, независимо от выбранного метода определения, оказались выше аналогичных показателей болотных экосистем ключевого участка ЛТ. Рассмотрим более детально показатели углеродного баланса отдельно для каждой биоклиматической зоны. Нетто-ассимиляция и NPP по своей сути характеризуют приходную статью баланса. Как уже отмечено, первая из оце-

Т а б л и ц а 3

Показатели углеродного баланса северных болот Западной Сибири в 2005 г.

Показатель	Средняя тайга	Лесотундра
Безморозный период, дни	150	120
Ассимиляция, г С м <sup>-2</sup> период <sup>-1</sup>	329	249
Чистая первичная продукция, г С м <sup>-2</sup> год <sup>-1</sup>	342	161
Эмиссия CH <sub>4</sub> и CO <sub>2</sub> , г С м <sup>-2</sup> период <sup>-1</sup>	408	166
Разложение фитомассы, г С м <sup>-2</sup> год <sup>-1</sup>	96	25



нок несколько завышена за счет экстраполяции величин летних потоков на весь теплый период года. Вторая, по-видимому, занижена, так как подземная продукция оценивалась только в слое 0–30 см. Поправка может оказаться существенной в связи с более глубоким проникновением корней [11, 12], отчего реальное значение оценки, видимо, составляло около 200 г С/(м<sup>2</sup> · год). Разность между нетто-ассимиляцией и общей эмиссией углерода, которая включает дыхание растений, составила 83 г С/(м<sup>2</sup> · период). Принимая в расчет зимние потери [13] и сток углерода с болотными водами [14], общий баланс углерода для ЛТ остается положительным.

Показатели NPP и нетто-ассимиляция для ключевого участка СТ оказались относительно близкими к таковым в 2005 г. Небольшое расхождение полученных оценок можно было бы отнести за счет разных методов определения. Однако сделанные выше замечания относительно знаков поправок к сравниваемым показателям допускают гораздо большее превышение величины продукции над ассимиляцией. Как показано в работе [14], существенная часть первичной продукции верховых сфагновых болот может формироваться за счет потребления CO<sub>2</sub>, выделяющегося внутри экосистемы, и лишь частично за счет углекислого газа из атмосферы. Полученные оценки не позволяют дать определенный ответ на вопрос о знаке углеродного баланса болот средней тайги. Однако настораживает высокая величина эмиссии углерода в виде CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>, значительно превышающая ассимиляцию и NPP. Необходимы дополнительные исследования по оценке скорости минерализации торфа и дыхания болотных растений в реальных усло-

виях. Наметившийся климатический тренд в Западной Сибири может привести к сдвигу равновесия, превратив болота в источник CO<sub>2</sub>. В первую очередь этот процесс затронет хорошо дренированные участки и экосистемы верховых болот.

Работа выполнена при финансовой поддержке международного фонда ИНТАС, проект 03-51-6294 “The effect of climate change on the pristine peatland ecosystems and (sub)actual carbon balance of the permafrost boundary zone in subarctic Western Siberia (CASUS)”. Авторы выражают благодарность Ю. Коржову за помощь при выполнении некоторых полевых экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. Pearce, *New Scientist*, 2005, 2512, 12.
2. A. V. Naumov, *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present*, Novosibirsk, 2001, 110–112.
3. J. Alm, L. Schulman, J. Walden et al., *Ecology*, 1999, 80(1), 161–174.
4. A. Arneeth, J. Kurbatova, O. Kolle et al., *Tellus*, 2002, 54B, 514–530.
5. С. Н. Кирпотин, Т. А. Бляхарчук, С. Н. Воробьев, *Вестник ТГУ, Приложение 7*, 2003, 122–134.
6. Е. Д. Лапшина, А. Ю. Королюк, В. Блейтен и др., *Сиб. экол. журн.*, 2000, 5, 563–576.
7. А. А. Храмов, В. И. Валуцкий, *Лесные и болотные фитоценозы Восточного Васюганья*, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1977.
8. О. Л. Лисс, Н. А. Березина, *Болота Западной Сибири*, М., МГУ, 1981.
9. Е. А. Романова, *Типы болот СССР и принципы их классификации*, Л., Наука, Ленингр. отд-ние, 1974, 167–173.
10. Н. П. Косых, Н. П. Миронычева-Токарева, В. Блейтен, *Вестник ТГУ, Приложение 7*, 2003, 142–152.
11. T. Saarinen, *Can. J. Bot.*, 1996, 74, 934–938.
12. T. R. Moore, J. L. Bubier, S. E. Frohking et al., *J. Ecol.*, 2002, 90, 25–36.
13. J. Alm, S. Saarnio, H. Nykanen et al., *Biogeochemistry*, 1999, 44, 163–186.
14. A. V. Naumov, *Eurasian Soil Sci.*, 2004, 37, Suppl. 1, S58–S64.

## Carbon Balance in the Peat Bog Ecosystems of Western Siberia

A. V. NAUMOV, N. P. KOSYKH, N. P. MIRONICHEVA-TOKAREVA, E. K. PARSHINA

The article deals with the components and processes of carbon cycle in the northern peat bogs of Western Siberia. The features of carbon cycle functioning under the contrasting conditions of wetlands in the middle taiga and forest tundra are considered. The questions of the northern peatland functional condition are discussed in connection with the modern climatic trend.