

ЭМИССИЯ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ С УЧЕТОМ МИКРОРЕЛЬЕФА

© 2014 г. Т. В. Глухова, С. Э. Вомперский, А. Г. Ковалев

Институт лесоведения РАН, 143030, с. Успенское Московской обл., Одинцовского р-на, ул. Советская, 21
e-mail: root@ilan.ras.ru

Поступила в редакцию 04.06.2012 г.

Обобщены трехгодичные наблюдения вариации потоков диоксида углерода в связи с микрорельефом поверхности почвы. Получены более точные оценки годовой эмиссии CO₂ из олиготрофных торфяных болот с разной растительностью и обводненностью в южной тайге европейской территории России. Наибольшие различия в скоростях эмиссии CO₂ по элементам микрорельефа характерны для безлесного грядово-мочажинного комплекса, где микропонижения (иногда мертвопокровные) выделяют CO₂ в 2 раза меньше, чем ровные местоположения, и в 3 раза меньше, чем микроповышения. В лесных болотах различия потоков диоксида углерода по элементам микрорельефа существенно меньше. В грядово-мочажинном комплексе средневзвешенная по элементам микрорельефа эмиссия CO₂ (средняя за 3 года) составляла 436 г С/м² в год, в более дренированном естественном сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом 930 и в осушенном сосняке – 1292 г С/м² в год. В годовом потоке диоксида углерода из торфяных почв доля холодного периода (ноябрь–апрель) составила 10% в грядово-мочажинном комплексе, 17 и 24% в сосняках естественном и осушенном соответственно.

Ключевые слова: болотные биогеоценозы, мочажины, ровные местоположения, кочки.

DOI: 10.7868/S0032180X14010055

ВВЕДЕНИЕ

Способность болотных экосистем накапливать основную массу органического вещества в виде торфа определяется незамкнутостью их углеродного цикла. Поэтому болота являются важным биосферным фактором сдерживания увеличения концентрации CO₂ в атмосфере. С другой стороны, болота таят в себе опасность ускорить процесс разложения торфа при потеплении климата или хозяйственном использовании и способны увеличить эмиссию CO₂ и, тем самым, парниковый эффект.

Факт современного изменения (потепления) климата согласно Четвертому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата [8] стал официально признанным, и болота в нем рассматриваются как важнейший агент круговорота углерода в природе. Болота в России занимают 8% площади, а вместе с оторфованными заболоченными землями – 21% ее территории [1]. Современный баланс углерода болот далек от ясности. Закономерности и количественная оценка газообмена болот разного генезиса в различных природных и антропоген-

но-нарушенных условиях остаются слабоизученными, в частности, оценки эмиссии CO₂ в атмосферу.

Большинство оценок потоков CO₂ из болотных почв получено срочными измерениями разной частоты. Они относятся к регулярным измерениям в вегетационном периоде. В статье Глаголева с соавт. [5] приведен обзор исследований эмиссии CO₂ с поверхности болот на территории Западной Сибири по летним месяцам или вегетационному периоду. Средняя интенсивность выделения диоксида углерода болотами Западной Сибири 122 и 134 мг С/м² в час на олиготрофных и евтрофных соответственно. Суммарный поток за вегетационный период наибольший в высоком ярье (90) и минимальный (48 г С/м²) в осоково-сфагновой топи, средний по биогеоценозу исследуемого болота – 62 г С/м².

На юге Томской обл. [6] летне-осенняя эмиссия CO₂ находилась в диапазоне 23–370 в евтрофных болотах и достигала 400 мг С/м² в час в олиготрофных.

Потоки CO₂ в северо-восточной части Васюганского болота [9] в сосново-кустарничковом

биогеоценозе были равны 87.8 мг С/м² в час (за сезон май—сентябрь составили 45.1–136.6 г С/м²).

В Тверской обл. на территории Центрально-лесного заповедника наибольшая эмиссия углекислого газа в вегетационный период (225 мг С/м² в час) отмечена на сосновом облесенном болоте, а наименьшая (150 мг С/м² в час) в мезотрофных осоковых топях [12]. В этой же работе показано, что интенсивность потока CO₂ растет от мочажин (30 мг С/м² в час) к грядам с участием трав и кустарничков (82 мг С/м² в час), то есть эмиссия CO₂ с гряд более чем в 2.5 раза превышает эмиссию с мочажин. Повышенную эмиссию диоксида углерода (в 2–2.5 раза) по сравнению с микропонижениями некоторые авторы отмечали в болотных микроповышениях [3, 26, 28, 30].

В Карелии на сосново-сфагновом мелкоосоковом олиготрофном болоте в июне—июле газообмен был в пределах от 469 до 953 мг CO₂/м² в час [14].

В Колымской низменности [25] скорость выделения CO₂ в полигональных болотах разных стадиях зарастания изменялась от 142 до 324–431 мг С/м² в час (дневные данные).

Наумов [20] приводит оценки углеродного баланса болотных экосистем подзон северной, средней и южной тайги. Автор отмечает, что полученные оценки аккумуляции углерода в болотах Западной Сибири несколько завышены из-за недоучета потоков углерода в атмосферу в зимний период. Оценок зимних потоков диоксида углерода крайне мало. Можно сослаться на собственные работы [1, 3], а также на исследования, проведенные в Колымской низменности [25], которые показали суммарные потери диоксида углерода за весь срок биологической активности (209 дней) на плакорном участке тундровых почв — 402 г С/м² и за 159 дней в приозерном понижении — 203 г С/м². В период промерзания профиля почвы выделялось 22.5 и 36.6 г С/м², что составляло 5.6 и 18.7% от годовой эмиссии CO₂ плакорной и болотной почв соответственно.

Исследования, проведенные в течение двух лет в южно-таежной зоне [17, 18], показали, что доля холодного периода в годовом потоке CO₂ составляла 21–27% в естественных ценозах и 12–14% — в агроценозах.

Результаты наиболее полных круглогодичных 11-летних исследований [13] говорят о том, что доля холодного периода (ноябрь—апрель) в годовом потоке диоксида углерода из почв лесной зоны в среднем за годы наблюдений составила 21–28%. В зависимости от погодных условий она может меняться от 11–16% (годы с теплым, влажным летом и холодной зимой) до 38–42% (годы с жарким летом и теплой зимой).

Таким образом, чтобы избежать существенных искажений при оценке годовых потоков CO₂ и, особенно, баланса углерода в биогеоценозах южно-таежной зоны, необходимо учитывать эмиссию CO₂ в холодный период года. Она, как видно из краткого обзора, составляет значительную часть. Кроме того, в ценозах с выраженным микрорельефом при балансовых расчетах углерода нужны средневзвешенные оценки эмиссии углекислого газа по элементам микрорельефа.

Целью нашего исследования являлось изучение годовой эмиссии CO₂ с поверхности верхних болотных почв с учетом микрорельефа, а также оценка вклада разного времени года в суммарные годовые потоки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Эмиссию диоксида углерода с поверхности верхних болотных почв южно-таежной зоны изучали на Западновинском лесоболотном стационаре Института лесоведения РАН в Тверской обл. (56° N, 32° E). Исследования проводили в олиготрофных болотных микроландшафтах (биогеоценозах): грядово-мочажинном безлесном (с редкой сосной по болоту), сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом естественном, древостой IV класса бонитета и сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом, осушенном 30 лет назад, древостой III класса бонитета. Мощность торфяных отложений на объектах исследования — 4.0, 2.0 и 0.8 м соответственно в безлесном болоте, сосняках естественном и осушенном. Возраст древостоя в сосняках, естественном и подвергнутому мелиорации — 60 лет. Эмиссию CO₂ определяли круглогодично в течение трех лет: с августа 2004 по июль 2006 и с января по декабрь 2007 гг.

Растительный покров нижних ярусов в двух естественных изучаемых болотных ценозах довольно сходный. В травяно-кустарничковом ярусе: голубика (*Vaccinium uliginosum*), кассандра (*Chamaedaphne calyculata* (L.)), багульник болотный (*Ledum palustre* L.), подбел многолистный (*Andromeda polifolia* L.), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.), клюква (*Vaccinium oxycoccos* L.) и др. В моховом ярусе сфагновые мхи: *Sphagnum magellanicum* Brid., *Sph. fuscum* (Schimp.) Klinggr., *Sph. balticum* (Russ) C. Jens., *Sph. angustifolium* (Russ.) C. Jens и др., а также *Gymnocolea inflata* (Huds.) Dum., *Polytrichum strictum* Sm. Древесный ярус приурочен в основном к микроповышениям, его значительно меньше в ровных местоположениях, и он отсутствует в мочажинах.

В нижнем ярусе сосняка осушенного преобладают те же кустарнички, но в моховом покрове сфагновые мхи встречаются реже. Некоторые свойства поверхностного слоя торфа даны в табл. 1, они характерны для олиготрофных болот. Сосняк

Таблица 1. Некоторые характеристики поверхностного слоя торфа опытных объектов

Глубина слоя, см	Микропонижения			Микроповышения		
	степень разложения	зольность	плотность, г/см ³	степень разложения	зольность	плотность, г/см ³
	%			%		
Грядово-мочажинное безлесное болото						
0–5	6	2.5	0.027	8	1.4	0.021
5–15	9	4.2	0.040	10	2.7	0.031
15–25	7	3.1	0.048	14	4.1	0.048
Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый неосушенный						
0–5	7	2.0	0.052	5	2.1	0.026
5–15	28	3.9	0.073	12	2.3	0.049
15–25	25	4.6	0.071	15	2.3	0.083
Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый осушенный						
0–5	15	5.4	0.068	18	3.8	0.054
5–15	20	4.9	0.115	22	5.0	0.081
15–25	25	4.1	0.211	22	3.5	0.128

неосушенный сравнительно недавно вступил в фазу олиготрофного развития, и в профиле его торфяной почвы уже с глубины 10–12 см проследивается более разложенный торф с относительно большей плотностью. После лесосушительной мелиорации плотность увеличилась в 1.3–3.0 раза, сопровождаясь усадкой поверхности болота. На объектах исследования была выполнена нивелировка поверхности почвы по квадратам 2 × 2 м. Это давало количественную оценку морфологии микрорельефа и площадную представленность микроповышений, микропонижений и ровных местоположений. Амплитуда высотных различий составляла 28.0 ± 1.4 см в безлесном болоте и 22.8 ± 1.1 см в сосняке естественном [4]. В осушенном сосняке высотные различия более сглажены.

Эмиссию CO₂ по элементам микрорельефа измеряли портативной фотосинтетической системой Li 6400 фирмы Li COR Biosciences, Inc., USA, оснащенной штатной непрозрачной камерой для измерения потоков CO₂ из почвы. В теплое время года (май–октябрь) измерения проводили ежедневно в первой половине дня, в холодное время (ноябрь–апрель) – один раз в месяц. Зимой поток CO₂ определяли с поверхности снежного покрова, без его нарушения со специальной платформы, не позволяющей почвенной камере опускаться глубже 3 см и проваливаться в снег.

В теплое время года на каждом элементе микрорельефа предварительно (за сутки до измерения эмиссии) на глубину 10 см врезали полые пластиковые цилиндрические основания (воротники) высотой 15 см, диаметром 10 см с заточенным по окружности нижним краем, на которые

ставили почвенную камеру. Травяно-моховой покров при этом не нарушали, то есть определяли суммарную (почвы и растений) дыхательную активность [12, 25]. В общей сложности в каждом болотном биогеоценозе было установлено по 30 воротников. На каждом из них в определенные сроки проводили 4 цикла измерений, данные трех последних из них использовали в расчете средней скорости потока диоксида углерода. Воротники в течение всего периода исследований находились на одних и тех местах, приуроченных к разным элементам микрорельефа. В зимнее время исследования проводились в тех же элементах микрорельефа, где стояли воротники для почвенной камеры. Параллельно с определением эмиссии CO₂ измеряли температуру воздуха и торфа на глубине 20 см, а также уровень почвенно-грунтовых вод (УПГВ) от поверхности. Температуру воздуха и торфа измеряли датчиками, входящими в комплект Li COR. Замеры УПГВ осуществляли полой алюминиевой трубкой, диаметром 1 см и длиной 150 см с нанесенными по внешней стороне миллиметровыми рисками, в смотровых скважинах (колодцах), которые представляют собой полые, перфорированные по всей длине, пластиковые трубы диаметром 3 см, один из концов которых закреплен в минеральном грунте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика погодных условий и й. Анализ результатов многолетних наблюдений за температурой воздуха и количеством выпавших осадков, проводимых метеопостом г. Западная Двина, показал, что среднемноголетняя

(за последние 15 лет, начиная с 1993 г.) среднегодовая температура воздуха составляет 6.1°C. Температура воздуха февраля – самого холодного месяца, равна –7.4°C (от –1.5 до –12.3°C), а июля – самого теплого месяца, 18.4°C (от 16.2 до 22.3°C). По данным метеопоста, среднегодовая сумма осадков за 15 лет составляет 752 мм. В отдельные годы количество осадков может колебаться от 267 (2002 г.) до более 850 мм (1998, 2000, 2003 гг.). Основная часть осадков (около 500 мм) выпадает за теплый период года, за три летних месяца – около 300 мм. Самым влажным летним месяцем является июль (98 мм).

По среднемноголетним собственным данным (результаты снегосъемки на Западновинском лесоболотном стационаре) максимальная мощность снежного покрова к началу марта достигает 40–45 см.

Основные погодные характеристики трех лет наблюдений показаны на рис. 1 (по данным метеопоста г. Западная Двина). Меньше всего осадков выпало с августа 2005 по июль 2006 гг., всего 484 мм, в предыдущий и последующий периоды наблюдений – 737 и 783 мм соответственно. Среднегодовая температура воздуха с августа 2005 по июль 2006 гг. составила 4.9°C, в предыдущий и последующий периоды 5.6 и 6.4°C соответственно. За 3 года наблюдений случались и аномальные погодные условия, не позволяющие обеспечить систематичность наблюдений. Очень низкая температура воздуха была в январе 2006 г. и достигала –33...–35°C, Li Cor при такой температуре не может работать, и определить эмиссию CO₂ из болотных почв в этот срок не удалось. В апреле 2006 г. резко потеплело, и в середине месяца температура воздуха повысилась до 6°C (рис. 1), весь снег растаял, дороги стали непроезжими и с трудом можно было добраться лишь до грядово-мочажинного болота. В 2007 г. январь был совершенно бесснежным, до конца второй декады держалась плюсовая температура. На верховом безлесном болоте вода стояла на поверхности.

Таким образом, погодные условия периода наблюдений двух лет (2005, 2007 гг.) отражали обычный естественный фон как по количеству выпавших осадков, так и по среднегодовой температуре воздуха. Однако температура воздуха февраля была ниже среднемноголетней на 0.8°C в 2005 г. и на 3.8°C в 2007 г., а августа – превышала на 2.3°C в 2007 г. Высота снежного покрова достигала 45–50 см, что немного больше, чем средняя многолетняя.

Исключением стал 2006 г., когда осадков выпало на 268 мм меньше средних многолетних за год, и температура воздуха была меньше средней многолетней на 1.2°C (январь и февраль были холоднее на 3.7 и на 4.9°C соответственно). Летние месяцы по температуре воздуха не отличались от среднемноголетних значений. Высота снежного

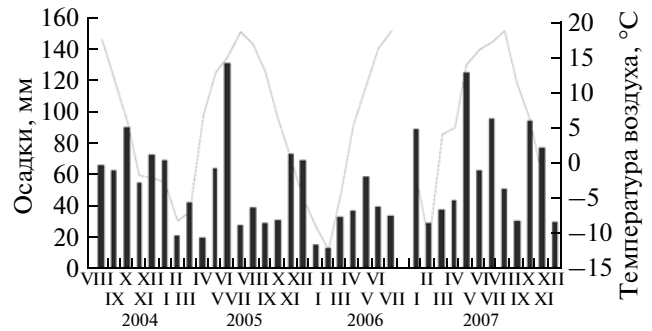


Рис. 1. Сумма осадков по месяцам и среднемесячная температура воздуха (по данным метеопоста г. Западная Двина).

покрова была в пределах нормы. Этот период исследований был самым сухим и холодным по сравнению с двумя другими годами исследований и средними многолетними.

Динамика суточной эмиссии CO₂ из болотных почв. Суточный ход эмиссии CO₂ в июле 2005 г. на объектах исследования в ровных местоположениях (рис. 2) показал, что наибольшая эмиссия была в 14–18 ч на безлесном болоте (232–235 при среднесуточной 184 мг С/м² в час), в сосняках этот период растянут до 20 ч и в это время суток эмиссия CO₂ несколько возрастает по сравнению с 18 ч. Так, в естественном сосняке эмиссия диоксида углерода в 14–20 ч составляет 196–224 при среднесуточной 168 мг С/м² в час, в осушенном сосняке 265–281 при среднесуточной 221 мг С/м² в час. Наименьшие значения приходятся на утреннее время, с 4 до 8 ч: 111–148, 120–125 и 169–177 мг С/м² в час в безлесном болоте и сосняках естественном и осушенном соответственно. Значения эмиссии CO₂ с поверхности болот наиболее близко соответствуют среднесуточным значениям с 10 до 12 ч. Плавный ход суточной эмиссии наблюдался на открытом грядово-мочажинном болоте и в осушенном сосняке, с некоторыми колебаниями – в сосняке неосушенном (рис. 2). По данным Наумова [21, 22], на верховом сфагновом болоте в Томской обл. максимальное выделение CO₂ было в 15–17 ч, минимальное – в утреннее время, в 5–8 ч. Эмиссия углекислого газа имеет четко выраженную суточную динамику.

Годовая динамика эмиссии CO₂ из болотных почв с учетом микрорельефа. В теплый период (май–октябрь) различия в скоростях эмиссии углекислого газа (среднее за 3 года) по элементам микрорельефа достоверны в безлесном болоте и сосняке осушенном. В сосняке неосушенном в этот период различия недостоверны, так как повышенные элементы рельефа, особенно в летние месяцы,

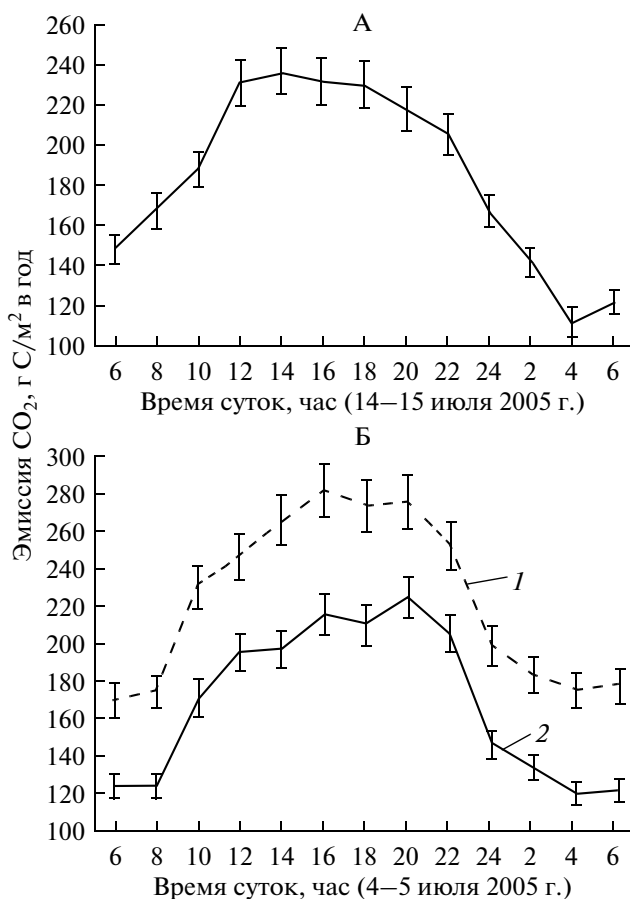


Рис. 2. Суточный ход эмиссии CO₂. А – грядово-мочажинное безлесное болото; Б – сосняки кустарничково-пушицево-сфагновые: 1 – осушенный; 2 – неосушенный.

пересыхают и эмиссия CO₂ становится мало различимой в микропонижениях, ровных местоположениях и микроповышениях. В холодный период (ноябрь–апрель) различия в скоростях эмиссии по элементам микрорельефа во всех трех биогеоценозах достоверны, при значительно меньших потоках, чем в теплый период.

Грядово-мочажинное безлесное болото. Эмиссию CO₂ в трех болотных биогеоценозах определяли круглогодично в течение двух лет: с августа 2004 г. по июль 2006 г., затем следовал перерыв 5 месяцев и исследования были возобновлены в 2007 г., что и отражено на рис. 3–5. За три года наблюдений на этом болоте ни разу не было отрицательных температур почвы. Уровень почвенно-грунтовых вод был постоянно высоким, только однажды (июль 2006 г.) за годы исследований опускался до 19.5 см от поверхности (рис. 3) при минимальном количестве осадков в это время. По результатам нивелировки поверхности по квадратам 2 × 2 м мочажины занимают

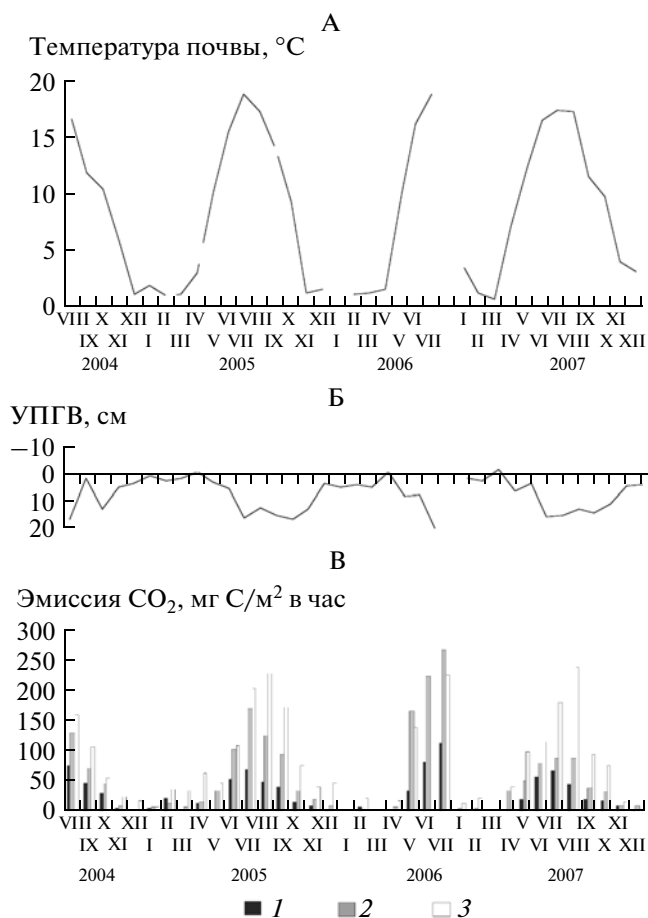


Рис. 3. Многолетняя среднемесячная динамика температуры почвы грядово-мочажинного безлесного болота (А), УПГВ (Б), эмиссии CO₂ (В). Здесь и на рис. 4, 5: 1 – микропонижения; 2 – ровная поверхность; 3 – микроповышение.

37%, ровные местоположения 39% и кочки 24% площади болота.

Наблюдения за скоростью эмиссии CO₂ из болотной почвы в течение трех лет выявили ее сезонную изменчивость. Максимальные значения отмечены в летние месяцы (67 ± 5; 140 ± 12; 180 ± ± 16 мг C/m² в час в мочажинах, ровных местоположениях, кочках соответственно), минимальные – в зимние (5 ± 0.6; 6 ± 0.7; 20 ± 1.3 мг C/m² в час в тех же элементах микрорельефа), они зависят от комплекса погодных и гидротермических условий, к которым относятся температура почвы (торфа) и воздуха, УПГВ. Чем ниже УПГВ от поверхности и выше температура почвы, тем скорость эмиссии CO₂ больше и наоборот (рис. 3). Зависимость выделения углекислого газа из почвы от гидротермических условий отмечают многие исследователи. Некоторые из них [5, 7, 15, 19] связывают положительную интенсивность выделения CO₂ с температурой почвы. Другие [12, 23] приводят достоверные отрицательные корреля-

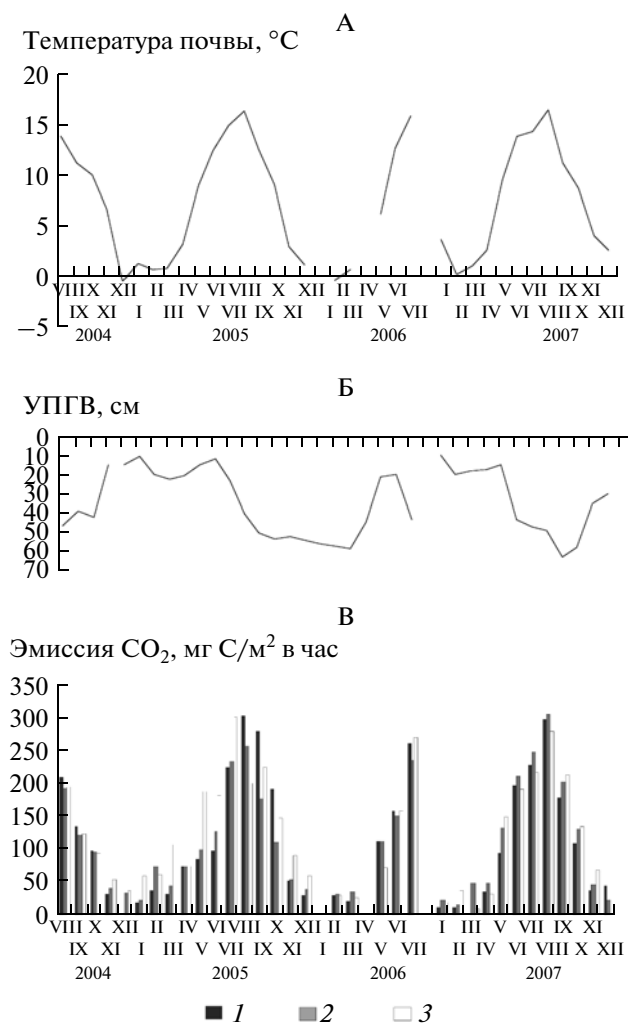


Рис. 4. Многолетняя среднемесячная динамика температуры почвы сосняка кустарничково-пушицево-сфагнового неосушенного (А), УПГВ (Б), эмиссии CO₂ (В).

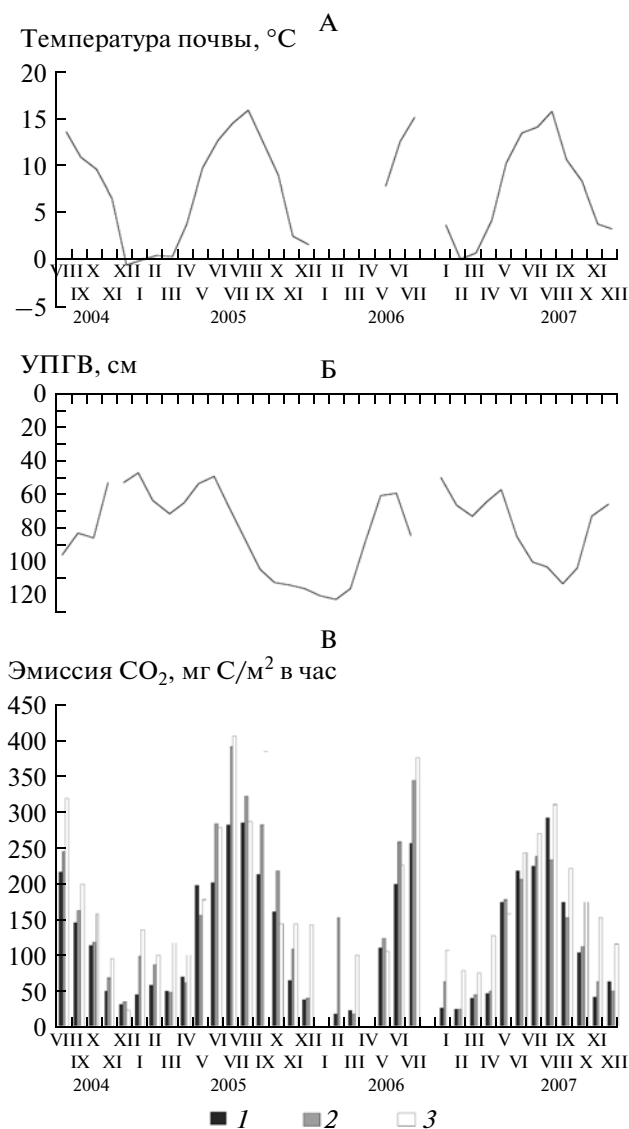


Рис. 5. Многолетняя среднесуточная динамика температуры почвы сосняка кустарничково-пушицево-сфагнового осушенного (А), УПГВ (Б), эмиссии CO₂ (В).

ции эмиссии углекислого газа с УПГВ. Более слабая положительная зависимость выявлена между эмиссией CO₂ и температурой воздуха и влажностью торфа [5, 14]. В работе Лопеса де Гереню [17] подчеркнуто, что статистические зависимости эмиссии углекислого газа от гидротермических условий не всегда очевидны и зависят от множества различных факторов, в частности разных сезонов года, почв и т. д.

В грядово-мочажинном комплексе микро рельеф вследствие сильной его развитости [4] имеет большое значение в пространственном распределении продуцирования CO₂ по площади. Интенсивность круговорота веществ выше в грядах и ниже в мочажинах, которые часть периода наблюдений залиты водой (эмиссия равна нулю), а

зимой лед на их поверхности становится препятствием для выхода CO₂. Везде, где отсутствуют значения эмиссии CO₂, кроме января 2006 г. (о чем было сказано выше), воротники были наполнены водой и потоки диоксида углерода не фиксировались, в марте 2007 г. во всех воротниках был лед (рис. 3). Скорость эмиссии CO₂ растет в ряду: мочажины – ровная поверхность – гряды, исключением был 2006 г. (май–июль), когда потоки углерода с ровной поверхности были больше, чем с кочек. В 2006 г. май–июль были самыми сухими и теплыми по сравнению с этими месяцами в предыдущем и последующем годах. Вероятно, при хорошо прогретой почве и все же большем запасе влаги, чем в кочках, ровные поверхности выделяли CO₂ больше, что возможно было

вызвано возросшей активностью микробных сообществ в этих микросайтах. Эмиссия диоксида углерода с поверхности мочажин в эти месяцы в два раза превосходила эмиссию с этих же мочажин в другие годы исследований.

В теплое время года (май–октябрь) в безлесном болоте с мочажин, ровных поверхностей и кочек эмиссия CO_2 составляет (среднее за три года) 46 ± 5 ; 101 ± 13 и 137 ± 18 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час (при доверительной вероятности $P \geq 0.95$), в холодное (ноябрь–апрель) – 4 ± 0.8 ; 9 ± 1.1 и 23 ± 2.2 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час ($P \geq 0.95$) соответственно. Ровные поверхности в теплое время года продуцируют CO_2 в 2 раза, а кочки – в 3 раза больше, чем мочажины. В холодный период соотношение для ровных поверхностей и мочажин сохраняются, но поток диоксида углерода с кочек в 5 раз больше, чем с мочажин (при значительно меньших скоростях эмиссии, чем в теплое время).

По данным других исследователей, в Тверской обл. поток углекислого газа из мочажин в среднем за вегетационный период составляет 30, а из гряд с различным составом растительности 19–82 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [12]. На этом же верховом болоте средние значения эмиссии CO_2 за один летний месяц в мочажинах 42–122, а в грядах 38–210 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [26]. В Колымской низменности в мочажинах сабельниковых, сфагновых и зеленомошных эмиссия была равна 16–68 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [25].

Таким образом, наши исследования согласуются с данными других авторов и показывают, что эмиссия углекислого газа из мочажин безлесных верховых болот меньше, чем из более дренированных элементов микрорельефа.

Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый естественный. В течение трех лет наблюдений в сосняке два раза отмечены отрицательные температуры почвы, не превышающие -0.5°C : в декабре 2004 г. и феврале 2006 г. (рис. 4). Поскольку болотный сосняк естественный более дренирован, чем безлесное болото, то и УПГВ здесь колеблется сильнее, максимальные опускания его доходили до 54–63 см, отмеченные в конце 2005–начале 2006 гг. и осенью 2007 г. По результатам нивелировки поверхности микропонижения занимают 52%, ровные поверхности 31% и микроповышения 17% площади.

Выделение углекислого газа в сосняке, как и в безлесном болоте, имеет сезонную изменчивость. В летние месяцы эмиссия CO_2 достигает максимальных значений в микроповышениях (221 ± 21 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час), зимой повышенные элементы микрорельефа выделяют всего 48 ± 5 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час. Скорость эмиссии CO_2 в болотном сосняке естественном, вследствие более интенсивного здесь круговорота веществ, выше, чем в грядово-мочажинном болоте. Дыхательная активность по ряду

данных возрастает от переувлажненных фаций к более дренированным [12, 25]. В теплое время года не всегда микроповышения продуцируют CO_2 больше, их место занимают ровные местоположения, а иногда и микропонижения, вероятно из-за пересыхания повышенных элементов рельефа и более доступной влаги в понижениях и ровных местообитаниях, где сохраняются лучшие условия газообмена и активизации микроорганизмов. Средняя скорость потока CO_2 из почвы в теплое время года (май–октябрь) достигает 180 ± 13 ; 174 ± 12 и 185 ± 24 (различия недостоверны), в холодное (ноябрь–апрель) – 28 ± 4 ; 40 ± 5 и 53 ± 9 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час ($P = 0.90$) в микропонижениях, ровных поверхностях и микроповышениях соответственно. В летние месяцы различия в эмиссии CO_2 по элементам микрорельефа незначительны. Более высокое выделение углекислого газа из почвы в этом ценозе связано здесь с большей зоной аэрации, повышением температуры почвы и автотрофным дыханием корней древостоя, который отсутствует на безлесном болоте. В зависимости от развития древесного яруса некоторые авторы дыханию корней отводят главную роль в летней почвенной эмиссии CO_2 [11, 17, 18]. Годовой вклад корней может составлять 33% от эмиссии CO_2 из почвы и варьировать в широком диапазоне – от 10 до 58% [16]. В зависимости от вида растительности, сезона исследования приводят еще более широкие пределы – от 6 до 95% [10].

По литературным данным эмиссия CO_2 с верховых сфагновых болот Западной Сибири составляет 14–283 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [5], в сосново-кустарничковых ценозах Васюганского болота с мая по сентябрь она была 71–114 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [9], верховые сфагновые болота в Томской обл. в июле–августе выделяли 119–419 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [22], в Тверской обл. в августе после продолжительного засушливого периода эмиссия достигала 220 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [12], потоки диоксида углерода в осоковых и пушицево-сфагновых болотах Колымской низменности изменялись от 22 до 253 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в час [25].

Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый осушенный. За период наблюдений в сосняке осушенном два раза были отмечены отрицательные температуры почвы, менее -1.0°C : в декабре 2004 и январе 2005 гг. (рис. 5). Колебания УПГВ здесь значительны: максимальные достигают 122 см, минимальные – 48 см. Самые низкие уровни зафиксированы в конце 2005 (116 см)–начале 2006 гг. (122 см) и сентябре 2007 г. (114 см). По данным нивелировки поверхности микропонижения занимают 11%, ровные местоположения 54%, а микроповышения 35% площади.

В теплое время года, как и в сосняке неосушенном, средние местоположения, а иногда и

Таблица 2. Годовая эмиссия CO₂ из почв олиготрофных болот по элементам микрорельефа, г С/м²

Годы наблюдений	Элементы микрорельефа			Средневзвешенный поток CO ₂ с площади
	микropонижения	ровные поверхности	микropовышения	
Грядово-мочажинное безлесное болото				
2004–2005	228	438	617	403
2005–2006	254	690	831	562
2007	172	320	649	344
Среднее	218 ± 24	483 ± 109	699 ± 67	436 ± 65
Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый неосушенный				
2004–2005	759	844	1075	839
2005–2006	1051	878	932	977
2007	908	1046	1052	975
Среднее	906 ± 84	923 ± 91	1020 ± 42	930 ± 46
Сосняк кустарничково-пушицево-сфагновый осушенный				
2004–2005	1054	1269	1528	1336
2005–2006	993	1347	1486	1357
2007	1032	1027	1472	1183
Среднее	1026 ± 18	1214 ± 96	1495 ± 17	1292 ± 55

микropонижения выделяют CO₂ больше, чем микropовышения (рис. 5). В среднем за 3 года исследований в теплый период скорость выделения CO₂ составляла 196 ± 12; 221 ± 23 и 244 ± 31 ($P = 0.80$), а в холодное время года – 42 ± 3; 62 ± 8 и 108 ± 12 мг С/м² в час ($P \geq 0.95$) в микropонижениях, ровных поверхностях и микropовышениях соответственно. Сосняк, подвергнутый осушительной мелиорации, в среднем продуцирует CO₂ приблизительно в 2 раза больше, чем сосняк неосушенный и в 3 раза больше, чем безлесное грядово-мочажинное болото. Это подтверждается и другими исследователями [6, 14].

В сосняке осушенном высотные различия по элементам микрорельефа более сглажены, чем в двух других рассматриваемых ценозах. Однако эмиссия диоксида углерода все же больше с повышенных элементов рельефа, чем с понижений, поскольку деревья, в основном, произрастают именно на микropовышениях и их корневые системы вносят заметный вклад в общий поток CO₂ с этих элементов рельефа.

Суммарные годовые потоки CO₂ из почв верховых болот. Различия болот в обводненности, растительности, режиме питания и пространственная неоднородность торфяной почвы – наличие кочек, гряд, мочажин, озерков, ровных местоположений, обуславливают особенности формирования потоков CO₂ с поверхности болот в атмосферу. Без учета последних трудно предвидеть эффективность разных видов пользования болотами и последствия для изменения их биосферных функций. Высотное положение кочек, мочажин, ровных местоположений предполагает разную зону аэрации в них и, соот-

ветственно, отличающиеся парцеллярную нетто-первичную продукцию, массу опада и структуру почвенного дыхания [27, 29]. При достоверных отличиях потоков углерода по разным элементам микрорельефа средневзвешенные оценки для всей площади биогеоценоза рассчитываются в соответствии с представленностью их на территории болотного микроландшафта в целом. Различия по годам наиболее заметны в безлесном грядово-мочажинном болоте и мало отличаются в сосняках естественном и осушенном. В период 2005–2006 гг., суммарные потоки эмиссии CO₂ были самыми высокими во всех трех болотных ценозах (табл. 2). Этот год отмечен как самый сухой и относительно менее теплый, чем другие годы. Мочажины безлесного болота продуцируют углерод в 2 раза меньше (218 г С/м² в год), чем ровные местоположения (483 г С/м² в год), и в 3 раза меньше, чем кочки (699 г С/м² в год). В сосняках эти значения мало различаются по элементам микрорельефа. В целом (по средневзвешенным потокам) торфяная почва безлесного болота выделяет CO₂ в 2 раза меньше, чем более дренированного сосняка естественного, и в 3 раза меньше, чем подвергнутого осушительной мелиорации сосняка кустарничково-пушицево-сфагнового. Среднемноголетние значения выделения углерода южно-таежными торфяными почвами составляют 436, 930 и 1292 г С/м² в год в безлесном грядово-мочажинном болоте, сосняках кустарничково-пушицево-сфагновых неосушенном и осушенном соответственно (табл. 2).

Другие авторы рассматривают только вегетационный период: для подзоны южной тайги величины эмиссии CO₂ изменяются от 45.3 до 136.6 г С/м² [9],

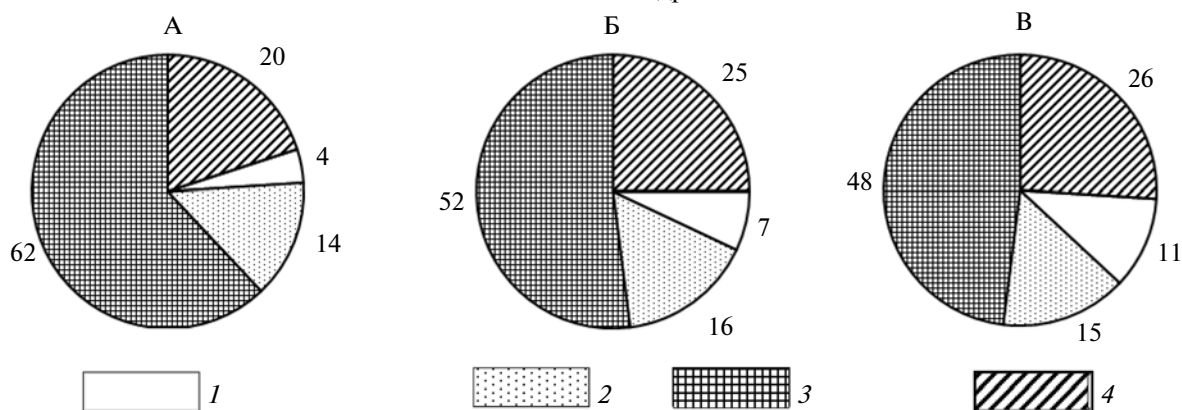


Рис. 6. Вклад времен года (1 – зимы; 2 – весны; 3 – лета; 4 – осени) в годовую эмиссию CO₂ (%) из грядово-мочажинного безлесного болота (А); сосняка кустарничково-пушицево-сфагнового неосушенного (Б) и осушенного (В).

в Карелии естественные и осушенные болота выделяют углекислый газ в количестве 366 и 725 г С/м² соответственно [14], потоки CO₂ в болотах Сибири составляют 171 [21] и 142–204 г С/м² [23].

Эти данные несколько занижены из-за недоучета холодного времени года. Валовое дыхание за весь год исследований в дерново-слабоподзолистых почвах приводит Лопес де Гереню с соавт. [17], оно составляет 889 и 1150 г С/м² в год под лесом и лугом соответственно. Среднеголетние потоки CO₂ в луговых ценозах: 809 и 747 г С/м² в год дерново-слабоподзолистой и серой лесной почвах соответственно [13]. Данные вышеперечисленных исследователей [13, 17] сравнимы с нашими значениями годовой эмиссии углекислого газа из почв олиготрофных лесных болот южно-таежной зоны (табл. 2).

Вклад сезонов года в суммарные потоки диоксида углерода из торфяных почв олиготрофных болот. Вклад холодного времени года (ноябрь–апрель) в среднем за 3 года наблюдений в суммарную эмиссию углекислого газа составляет 10% в безлесном болоте, 17 и 24% в сосняках естественном и осушенном соответственно.

По литературным данным доля холодного периода (ноябрь–апрель) в годовом потоке диоксида углерода из почв южно-таежной зоны составляла 21–27% в естественных ценозах и 12–14% – в агроценозах [17, 24]. Поток CO₂ из тундровых почв Колымской низменности за период промерзания почвенного профиля составил 18.7% от годовой эмиссии углекислого газа [25]. Эмиссию CO₂ в холодный период необходимо учитывать в годовом потоке углерода из различных ценозов, чтобы не повлечь за собой ошибки при балансовых расчетах углерода в биогеоценозах южно-таежной зоны.

По нашим данным календарная зима в годовых потоках CO₂ оценивается в 4–11% (рис. 6). На

весну приходится довольно близкие значения 14–16%. Разнятся летние потоки: больше всего продуцирует безлесное болото (62%), меньше – сосняк естественный (52%) и еще меньший вклад (48%) в летний поток в сосняке осушенном. Эмиссия CO₂ осенних месяцев составляет 20–26% годовой эмиссии диоксида углерода.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшие различия в скоростях почвенной эмиссии CO₂ по элементам микрорельефа характерны для безлесного грядово-мочажинного болота, в котором микропонижения выделяют CO₂ в 2 раза меньше, чем ровные местоположения, и в 3 раза меньше, чем микроповышения. В болотных сосняках кустарничково-пушицево-сфагновых различия в выделении CO₂ по элементам микрорельефа значительно меньше.

2. Величина суммарных средневзвешенных по элементам микрорельефа годовых потоков CO₂ возрастает от 436 в безлесном верховом болоте до 930 в более дренированном сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом неосушенном и достигает 1292 г С/м² в год в мелиорированном сосняке.

3. В годовом потоке диоксида углерода из почв олиготрофных болот южно-таежной зоны доля холодного периода составляет 10% в безлесном болоте, 17% – в болотном сосняке естественном и 24% – в сосняке осушенном. Эмиссию углекислого газа в холодный период года, часто не учитываемую, нельзя игнорировать при расчете годовых балансов углерода в различных биогеоценозах.

4. Вклад летней эмиссии в годовую эмиссию CO₂ составляет 48–62%, осень вносит 20–26%, на весну приходится 14–16%, доля зимних месяцев не превышает 4–11%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вомперский С.Э., Иванов А.А., Цыганова О.П. и др.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
2. *Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В.* Годовая эмиссия CO₂ с поверхности почвы олиготрофных болот по элементам нанорельефа // Мелиорация, ведение лесного хозяйства и лесопользование. Мат-лы Всерос. симпозиума. СПб., 2006. С. 73–77.
3. *Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В.* Динамика годовой эмиссии CO₂ из почв олиготрофных болот южно-таежной зоны России с учетом нанорельефа // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии. Тез. докл. III Междунар. конф. Пушкино, 2007. С. 18–19.
4. *Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В. и др.* О методике оценки современного прироста торфа болот // Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана. Мат-лы междунар. симп. Петрозаводск, 2006. С. 48–60.
5. *Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А.* Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. № 2. С. 197–210.
6. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.* Летне-осенняя эмиссия углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 46–58.
7. *Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И., Лопес де Гереню В.О.* Микрометеорологическая оценка биогенных потоков диоксида углерода в типичных тундрах Восточной Чукотки // Почвоведение. 2005. № 7. С. 859–863.
8. Изменение климата: научно-физическая основа. Вклад рабочей группы I в четвертый оценочный доклад МГЭИК / Под ред. С. Соломон, Д. Чин, М. Мэннинг. 2007. 163 с.
9. *Инишева Л.И., Головацкая Е.А.* Элементы углеродного баланса олиготрофных болот // Экология. 2002. № 4. С. 261–266.
10. *Кудеяров В.Н., Курганова И.Н.* Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, общие оценки // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1112–1121.
11. *Кузяков Я.В., Ларионова А.А.* Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию CO₂ из почвы (обзор) // Почвоведение. 2006. № 7. С. 842–854.
12. *Курбатова Ю.А., Минаева Т.Ю., Татаринцев Ф.А., Молчанов А.Г., Русанович Н.Р.* Временная и пространственная изменчивость газообмена CO₂ на верховом болоте южной Европейской тайги // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии / Под ред. Н.П. Лаверова. Пушкино, 2004. С. 41–51.
13. *Курганова И.Н.* Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2010. 48 с.
14. *Курец В.К., Дроздов С.Н., Таланов А.В., Попов Э.Г., Икконен Е.Н.* Терморезистентность сфагновых мхов и их вклад в газообмен болот // Тр. Карельского НЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 64–68.
15. *Курец В.К., Икконен Е.Н., Алм Ю., Таланов А.В., Дроздов С.Н., Силвола Е., Попов Э.Г.* Влияние светотемпературного режима и уровня грунтовых вод на CO₂-газообмен открытого участка олиготрофного болота // Экология. 1998. № 1. С. 14–18.
16. *Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес де Гереню В.О.* Дыхание корней и его вклад в эмиссию CO₂ из почвы // Почвоведение. 2003. № 2. С. 183–194.
17. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н.* Годовая эмиссия диоксида углерода из почв южнотаежной зоны России // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1045–1059.
18. *Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Розанова Л.Н., Сапронов Д.В.* Интенсивность дыхания и баланс углерода в почвах южно-таежной зоны в зимний и летний периоды // Тез. докл. III съезда ДОП. Суздаль, 2000. Кн. 1. С. 163–164.
19. *Машика А.В.* Эмиссия диоксида углерода с поверхности подзолистой почвы // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1457–1463.
20. *Наумов А.В.* Баланс углерода и эмиссия парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии / Под ред. Н.П. Лаверова. Пушкино, 2004. С. 51–58.
21. *Наумов А.В.* Дыхание почвы. Составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 207 с.
22. *Наумов А.В.* Дыхание растений и эмиссия углекислого газа в болотной экосистеме // Сибирский экологический журнал. 1997. № 4. С. 385–391.
23. *Наумов А.В., Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* Продуцирование CO₂ торфяной почвы слабо осушенного мезотрофного болота в связи с гидротермическими условиями сезона // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Мат-лы конф. М., 1999. С. 218–219.
24. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Отв. ред. Г.А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 315 с.
25. *Федоров-Давыдов Д.Г.* Дыхательная активность тундровых биогеоценозов и почв Колымской низменности // Почвоведение. 1998. № 3. С. 291–301.
26. *Шалухина Н.В., Варлагин А.В., Курбатова Ю.А.* Потоки CO₂ из почвы в лесоболотных экосистемах южной Европейской тайги // Биосферные функции почвенного покрова. Мат-лы Всерос. науч. конф. Пушкино, 2010. С. 342–343.
27. *Alm J., Talanov A., Saarinio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Vikkanen H., Marikkinen P.J.* Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland // Oecologia. 1997. V. 110. P. 423–431.
28. *Moore T.R., Bubier J.L., Frothingham S.E., Lafluer P.M., Roulet N.T.* Plant biomass and productivities and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog // J. of Ecol. 2002. V. 90. P. 25–36.
29. *Nungesser M.K.* Modelling microtopography in boreal peatlands: hummocks and hollows // Ecol. Model. 2003. V. 165. P. 175–207.
30. *Waddington J.M., Roulet N.T.* Atmosphere – wetland carbon exchanges: Scale dependency of CO₂ and CH₄ exchange on the developmental topography of a peatland // Global Biogeochem. Cycles. 1996. V. 10. № 2. P. 233–245.