

*На правах рукописи*

Икконен Елена Николаевна

**ВЛИЯНИЕ ОСУШЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ  
ВЫДЕЛЕНИЯ CO<sub>2</sub> МЕЗООЛИГОТРОФНЫМ БОЛОТОМ  
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ**

03.00.16 - экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук**

Санкт-Петербург

2000

Работа выполнена в лаборатории экофизиологии растений  
Института биологии Карельского научного центра РАН.

Научный руководитель: доктор биологических наук  
Курец В.К.

Официальные оппоненты: доктор биологических наук  
Юрковская Т.К.  
кандидат сельско-хозяйственных  
наук Саковец В.И.

Ведущая организация: Институт почвоведения МГУ - РАН

Защита диссертации состоится 19 апреля 2000 г. в 14.00 на  
заседании диссертационного совета К 00.46.01. по защите  
диссертаций на соискание ученой степени кандидата биологи-  
ческих наук при Ботаническом институте им. В.Л. Комарова  
РАН по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 2  
(зал Ученого Совета).

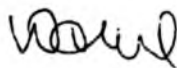
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ботаниче-  
ского института им. В.Л. Комарова РАН.

Автореферат разослан      марта 2000 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат биологических наук



Юдина О.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Низкие скорости минерализации органического вещества в сильно обводненных торфяных почвах естественных болот определяют постоянный сток в них атмосферного углерода.

В Карелии болота занимают 3,63 млн.га, а заторфованные почвы составляет 27% от общей площади республики (Елина и др., 1984). К настоящему времени 25 % общей площади болот южной Карелии осушено для целей лесного и сельского хозяйства (Гаврилов, 1997). Осушительная мелиорация изменяет гидрологический и тепловой режимы почв, скорость разложения органического вещества и углекислотный газообмен болота с атмосферой.

До настоящего момента нет единства мнений о том как влияет гидромелиорация на баланс углерода болотных систем. Причина заключается в том, что различные типы болот не идентично реагируют на изменение гидротермических условий. В связи с этим требуется изучение всего спектра болотных систем. Особую важность приобретает оценка интенсивности углекислотного газообмена наземных экосистем на фоне повышения концентрации углекислого газа в атмосфере за последние десятилетия.

Углеродный баланс является одним из основных показателей жизнедеятельности экосистемы. Оценить изменения, происходящие в болотной экосистеме под влиянием осушения можно по изменению вклада приходной и расходной частей углекислотного газообмена болота.

Цель исследования. Оценить выделение  $\text{CO}_2$  безлесным мезоолиготрофным болотом бореальной зоны в зависимости от гидротермических условий и изменение его интенсивности вследствие гидромелиорации.

Задачи исследования:

1. Определить основные факторы среды, влияющие на интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  болотной экосистемой.

2. Определить вклад составляющих выделения  $\text{CO}_2$  болотной экосистемой: темнового дыхания растительного сообщества, потока  $\text{CO}_2$  при разложении наземного опада и эмиссии углекислого газа из торфяной почвы.

3. Определить интенсивность продуцирования  $\text{CO}_2$  корнеобитаемым слоем торфяной залежи в зависимости от гидротермических условий.

4. Определить коэффициенты диффузии  $\text{CO}_2$  в торфяной почве и основные механизмы газопереноса из торфяника в атмосферу.

5. На основе статистических и динамических моделей оценить выделение  $\text{CO}_2$  болотом при прогнозируемом потеплении климата.

Научная новизна. Впервые описаны гидротермические зависимости составляющих выделения  $\text{CO}_2$  мезоолиготрофным болотом южной Карелии.

Установлен полиномиальный характер зависимости интенсивности продуцирования  $\text{CO}_2$  корнеобитаемым слоем торфяной залежи, представленным сфагновым торфом, от объемной влажности торфа.

Определена скорость диффузии  $\text{CO}_2$  в сфагновом торфе различной пористости аэрации. Установлено, что диффузионный поток газа из торфяной залежи составляет 40-50% от общей эмиссии  $\text{CO}_2$  из торфяной почвы.

Впервые для оценки и прогноза выделения  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи использованы динамические модели тепло-влажнопереноса и потока газа.

Показано, что в результате осушения мезоолиготрофного болота интенсивность темнового дыхания растительного покрова увеличивается в большей степени, нежели поток  $\text{CO}_2$  от разложения органического материала. Последнее косвенно

свидетельствует о том, что усиление фотосинтеза развивающейся после осушения растительности может компенсировать потери углерода торфяной залежью в процессе минерализации.

#### Практическая ценность.

Установлены закономерности изменения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  мезоолиготрофным болотом в зависимости от степени его осушения, что может быть использовано при расчетах региональных квот на выбросы газа в атмосферу в результате увеличения масштабов мелиорации.

Результаты исследований сделали возможной оценку выделения углекислого газа участком мезоолиготрофного болота при прогнозируемом изменении климата.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Втором делегатском съезде Российского Общества почвоведов (Санкт-Петербург, 1996), Международном симпозиуме по Палеопочвам и изменению климата (Lanzhou, 1998), Международном торфяном симпозиуме (Jokioinen, 1999), Молодежном съезде почвоведов им. Докучаева (Санкт-Петербург, 2000), заседаниях лаборатории экофизиологии растений Института биологии КарНЦ РАН (1992, 1993, 1994, 2000), семинаре лаборатории физиологии Ботанического института им. В.Л. Комарова (февраль, 2000).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 132 страницах машинописного текста и состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения. Содержит 20 таблиц и 23 рисунка. Список литературы включает 194 наименования литературных источников, в том числе 90 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Состояние вопроса по изученности газового режима болотных экосистем

На фоне увеличения содержания парниковых газов в атмосфере, в том числе и  $\text{CO}_2$ , вопросы оценки углекислотных потоков из биогеоценозов привлекают внимание исследователей разных стран. Это касается болотных (Laine, 1992; Silvola et al., 1992, 1996; Nykanen, 1995 ; Moore, 1996; Silvola, Alm, 1996; Alm, 1997; Bos, 1999; Saarnio, 1999) и тундровых экосистем (Billings et al., 1982; Peterjohn et al., 1993; Moore, Dalva, 1993; Johnson et al., 1994; McKane et al., 1994). В России изучается интенсивность дыхания минеральных почв (Ларионова и др., 1993; Кудеяров, 1995; Смагин, 1998; Федоров-Давыдов, 1998) и  $\text{CO}_2$ -газообмен в экосистемах различных типов (Вомперский, 1994; Саковец, 1997; Замолодчиков, Карелин, 1999; Ялынская, 2000). Большое количество работ указывает на значительную вариабельность интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  различными типами почв и экосистемами в целом, на тесную зависимость указанного процесса от климатических условий.

Вопрос о влиянии мелиоративного осушения на выделение  $\text{CO}_2$  болотами однозначного ответа не имеет. Существует мнение, что в результате освоения торфяных почв будут увеличиваться выбросы углекислого газа в атмосферу (Silvola, 1985). Другие исследователи считают, что за счет увеличения наземного и подземного опада процесс торфонакопления после осушения болота не прекращается (Laine, 1992; Вомперский, 1994; Minkkinen, Laine, 1999).

Исследования названных авторов касаются, в основном, выделения  $\text{CO}_2$  из почвы или экосистемы, без изучения процессов генерирования газа, механизмов газопереноса в почвенном слое. Изучение интенсивности продуцирования  $\text{CO}_2$  некоторыми органогенными почвами показало зависимость

данного процесса от гидротермических условий (Stevard, 1990; Bridgham, 1992; Magnusson, 1993).

## Глава 2. Объекты и методы исследований

Интенсивность выделения углекислого газа болотной экосистемой в атмосферу исследовали в двух географических районах Фенноскандии: в южной Карелии (Россия) и юго-восточной Финляндии.

Основной объем работы выполнен в условиях южной Карелии в подзоне средней тайги на мезоолиготрофном кустарничково-пушицево-сфагновом болотном участке, относящемся к болотному массиву евтрофно-мезотрофного типа. Работа осуществлена на базе болотного стационара Института биологии КНЦ РАН "Киндасово". Выбранный для исследования мезоолиготрофный тип болота широко распространен на территории южной Карелии и интересен своей информативностью как объект переходного состояния.

Микрорельеф исследуемого болотного участка - волнисто-равнинный. Кочки занимают 15% площади, равнинные участки - 85%. В травяно-кустарничковом ярусе повышений доминируют *Andromeda polifolia* L., *Eriophorum vaginatum* L. На равнинных пространствах преобладают *Andromeda polifolia* L., *Carex pauciflora* L., *Eriophorum vaginatum* L. В меньшем обилии присутствовали *Betula nana* L., *Carex rostrata* L., *Menyanthes trifoliata* L. Сплошной моховой покров на повышениях образует *Sphagnum balticum* L. с небольшой примесью *Sph. magellanicum* L., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr, на равнинных местах - *Sph. balticum* L. с примесью *Sph. magellanicum* L., *Sph. papillosum* L. В 1983 году часть изучаемого болотного участка была осушена канавами глубиной 1 метр с расстоянием между канавами 40 м. Осушение произведено в научных целях аналогично производственному лесосушению.

В результате осушения болота из растительного покрова исчезают гипергидрофильные виды: *Carex rostrata*, *Carex limosa*, *Sphagnum balticum*. Увеличивается проективное покрытие *Betula nana*, происходит облесение.

Исследования гидрологического, температурного и газового режимов неосушенного (далее в работе используем термин «естественного») и осушенного участков мезоолиготрофного болота южной Карелии проводили в течение вегетационных периодов 1992, 1994 годов. Изучали динамику содержания углекислого газа в почвенном воздухе корнеобитаемого слоя торфа, интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  болотом (валовое дыхание экосистемы), эмиссию углекислого газа из торфяной почвы.

В летний период 1993 г. изучали  $\text{CO}_2$ -газообмен мезоолиготрофного болота района восточной Финляндии, в моховом покрове которого преобладает *Sphagnum papillosum* L., в травянокустарничковом ярусе доминирует *Eriophorum vaginatum* L. (Alm et al., 1997).

Для определения концентрации  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе применяли пластмассовые цилиндрические пробоотборники, установленные с интервалом 5 см до глубины 20 см от поверхности торфяной залежи на естественном болотном участке и до глубины 40 см на осушенном. Отбор воздушной пробы производили шприцем ( $V=1 \text{ см}^3$ ) из трубки, соединенной с пробоотборником и выведенной на поверхность.

Потоки  $\text{CO}_2$  измеряли с помощью светонепроницаемых камер. Для определения интенсивности валового дыхания экосистемы камеры герметично устанавливали на поверхность болота с неповрежденным растительным покровом. Отбор воздушных проб из камер производили шприцем сразу после их установки и далее через каждые 5 минут в течение 20-30 минут. Измерение потоков  $\text{CO}_2$  выполняли с пятикратной повторностью два раза в неделю.



Содержание  $\text{CO}_2$  в пробах воздуха определяли на газовом хроматографе (Chrom-4). Для учета изменения концентрации углекислого газа в пробах за время ее транспортировки от места отбора до места анализа вводили временные поправки. Для исследования эмиссии  $\text{CO}_2$  из торфяного слоя на месте установки камеры была удалена растительность, опад и крупные корни.

Одновременно вели наблюдения за метеорологическими условиями: температурой и влажностью воздуха, атмосферным давлением, осадками, скоростью ветра и испаряемостью. Регистрировали температуру по слоям торфа, уровень грунтовых вод (УГВ), коэффициенты фильтрации. Тензиометрическим методом определяли давление почвенной влаги. Влажность корнеобитаемого слоя торфа определяли весовым методом. В расчетах гидрофизических характеристик торфа использовали зависимости, предложенные И.М. Нестеренко (1979) и Ю.В. Карпечко, И.М. Нестеренко (1996) для торфяников Южной Карелии.

Для определения динамики выделения  $\text{CO}_2$ , суммарных величин потоков за теплый период года и в целях прогнозирования использовали два вида моделей: нелинейную регрессию и динамические модели тепло-влаги-газопереноса.

### **Глава 3. Физические, водно-физические свойства торфа и метеорологические условия периода исследований**

Мощность торфяной залежи естественной части мезоолиготрофного болота района южной Карелии составляет 2,2 метра. Верхний слой торфа (0-0,4 м) - сфагново-мочажинный верховой плотностью  $0,028 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , степенью разложения 5-10%. На глубине 0,4-0,7 м - торф сфагновый переходный со средней степенью разложения 15%. Торфяная залежь осушенной части болота на глубине 0-0,3 м представлена сфагново-мочажинным верховым видом торфа плотностью  $0,04 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  и средней сте-

пенью разложения 10%. Ниже, до глубины 0,6 м залегает сфагново-переходный торф степенью разложения 15-20%.

Общее количество осадков за период наблюдений 1994 г (июнь-сентябрь) - 240 мм, что для района исследований в южной Карелии ниже нормы (352 мм). Средняя температура воздуха на высоте 0,5 м была близка к норме и составила 12,6 °С. Прогрев корнеобитаемого слоя торфа в начале вегетационного периода происходит интенсивнее на неосушенной части болота по сравнению с осушенной. Максимальные температуры верхнего (0-10 см) слоя торфяной залежи неосушенного и осушенного болотного участка приходятся на конец июля - начало августа и достигают 16,7°С на время наблюдения 12.00. Более глубокое по сравнению с осушаемым участком прогревание торфа (до 9,7°С на глубине 1,0 м) наблюдается на естественном болоте.

Объемная влажность верхнего слоя (0-10 см) сфагнового торфа естественного и осушаемого болотных участков изменялась в пределах 50-70% за период наблюдений.

Средний УГВ за вегетационный период 1994 г. отмечен на глубине 10 см от поверхности мха на неосушенной части болотного участка и 25-30 см на осушенной.

В 1993 г сумма температур в районе исследований восточной Финляндии была ниже нормы и составила 942 °С, сумма осадков близка к норме и составила 666 мм. В среднем за вегетационный период 1993 г уровень грунтовых вод на исследуемом мезоолиготрофном болоте был на глубине 5-7 см от поверхности.

#### **Глава 4. Потоки углекислого газа из естественной и осушаемой частей мезоолиготрофного болотного участка в атмосферу**

Выделение  $\text{CO}_2$  экосистемой обусловлено следующими процессами: темновым дыханием растительного сообщества

( $R_p$ ), эмиссией  $\text{CO}_2$  из почвы ( $R_T$ ) и потоком  $\text{CO}_2$  из наземного опада ( $R_{оп}$ ). Выражается это следующим уравнением:

$$R = R_p + R_T + R_{оп}, \quad (1)$$

где  $R$ - выделение  $\text{CO}_2$  (валовое дыхание экосистемы).

Средние за теплый период года значения интенсивности выделения углекислого газа ( $R$ ) равнинным участком мезоолиготрофного болота района южной Карелии на время наблюдения 12.00-14.00 составили  $307,5 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  для естественной и  $437,7 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  для осушаемой частей болота. Результаты наблюдений позволили выделить два пика интенсивности валового дыхания экосистемы (рис.1). Первый приходится на начало лета, когда экосистема как в естественном, так и в осушаемом состоянии выделяет наибольшее количество углекислого газа ( $1,1-1,2 \text{ гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ). Высокие значения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  болотом в июне при достаточно высоких УГВ и низких температурах связаны, в первую очередь, с интенсивным разложением растительного опада прошлого сезона.

Второй, меньший пик интенсивности потоков  $\text{CO}_2$  приходится на вторую половину июля - начало августа. Обусловлен он улучшением условий аэрации, повышением температуры торфа и, как следствие, активизацией микробного дыхания, разложением органического вещества и увеличением доли дыхания растений в связи с их переходом в фазу зрелости. Наблюдения показывают, что в период оптимальных гидротермических условий интенсивности валового дыхания мезоолиготрофного болота района южной Карелии и района восточной Финляндии сопоставимы и в среднем составляют  $350 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Выделение углекислого газа с поверхности кочки при средних за период вегетации значениях  $195,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  изменялись от  $36,8$  до  $413,7 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

Поток  $\text{CO}_2$ ,  $\text{мг/м}^2/\text{час}$

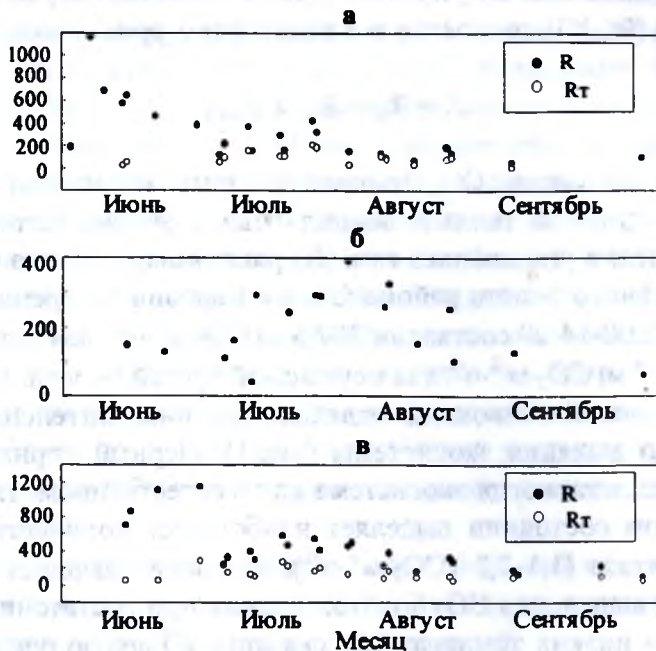


Рис. 1. Интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  ( $R$ ), эмиссия  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи ( $R_t$ ) естественной равнинной (а), возвышенной (в) и осушаемой равнинной (б) частей мезоолиготрофного болота района южной Карелии

Средняя за теплый период года скорость эмиссии углекислого газа из торфа ( $R_t$ ) мезоолиготрофного болота ю. Карелии по данным наблюдений составила  $82,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$  для естественного участка и  $134,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$  для осушаемого. Максимальные значения  $R_t$  приходятся на период оптимальных гидротермических условий во второй половине лета и равны  $206,8$  и  $265,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$  на естественной и осушаемой части болота соответственно.

Интенсивность выделения углекислого газа торфяной залежью болота района южной Финляндии при оптимальных условиях достигала  $65-140 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

В сентябре при высоких УГВ и низких средних температурах воздуха ( $5-7^\circ\text{C}$ ) наблюдаются наименьшие значения как валового дыхания естественного болота, так и дыхания торфяной почвы.

Для оценки суточной и сезонной динамики дыхания торфа и ценоза в целом и определения их суммарных величин за вегетационный период использован метод статистического моделирования. Определено, что интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  болотом связана с УГВ, температурой торфа и с уровнем предшествующего дневного газообмена. Анализ матрицы коэффициентов корреляции и зависимостей интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  от УГВ и температуры показал, что на естественном участке болота основную роль в регулировании эмиссии углекислого газа играет уровень обводнения. Осушение и понижение УГВ усиливает роль температуры.

Для расчета составляющих валового дыхания болотной экосистемы выбрана модель в виде уравнения множественной регрессии с двумя влияющими факторами: температурой воздуха у поверхности и УГВ. Для естественного участка она имеет вид:

$$\ln R(R_t, R_p) = a_0 + a_1 T + a_2 H + a_3 T \cdot H + a_4 T^2 + a_5 H^2, \quad (2)$$

для осушаемого:

$$\ln R(R_t, R_p) = a_0 + a_1 T + a_2 T \cdot H + a_3 T^2, \quad (3)$$

где  $R$  - выделение углекислого газа болотом;  $R_p$  - темновое дыхание растительного покрова;  $R_t$  - эмиссия  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи;  $R_{\text{оп}}$  - поток  $\text{CO}_2$  из наземного опада;  $T$  - температура воздуха у поверхности болота;  $H$  - уровень грунтовых вод,  $a_0$ ,

$a_1, a_3, a_4, a_5$  - коэффициенты уравнения, определяемые по результатам наблюдений.

Динамика среднесуточных значений углекислотных потоков мезоолиготрофного болота района ю. Карелии представлена на рис. 2. Случай, когда почвенное дыхание превышает

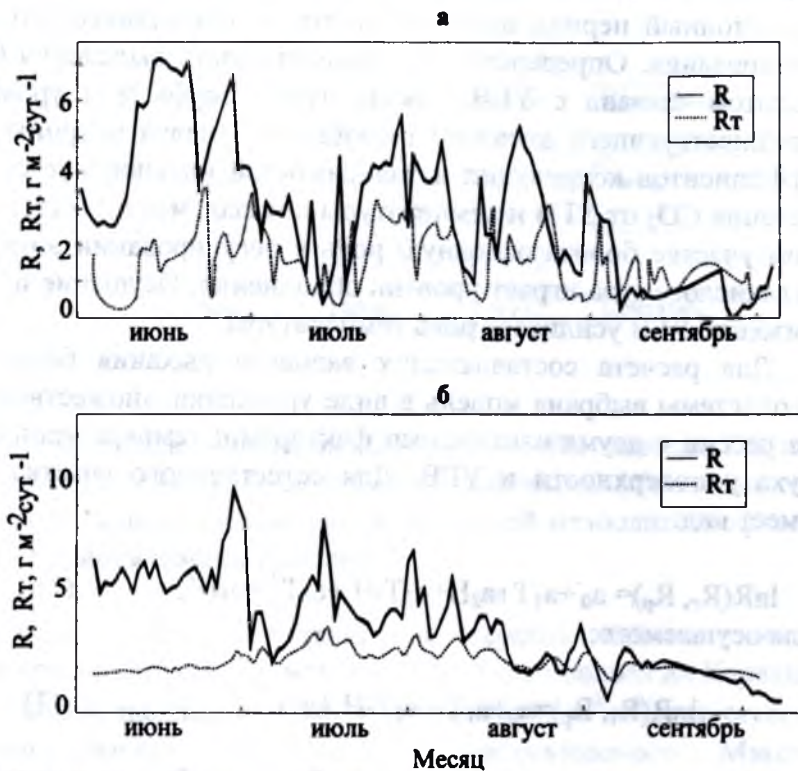


Рис.2. Вычисленные валовое дыхание (R) и эмиссия CO<sub>2</sub> из торфяной почвы (R<sub>T</sub>) естественной (а) и осушаемой (б) части мезоолиготрофного болотного участка района южной Карелии

общее выделение  $\text{CO}_2$  болотом, следует отнести к ошибке моделирования. Различия модельных (2,3) и наблюдаемых значений потоков  $\text{CO}_2$  достигают 30%.

Согласно расчетам по уравнениям 2 и 3 средние за вегетационный период значения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  равнинными участками мезо-олиготрофного болота района ю. Карелии составляют 3,17 на естественном и 6,11  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  на осушаемом.

Выделение газа (R) с поверхности кочки на 40% превышает соответствующие потоки с ковра. В среднем период вегетации для мезоолиготрофного болотного участка он равен 4,37  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Темновое дыхание растительного сообщества

Таблица 1

Валовое дыхание экосистемы безлесного мезоолиготрофного болота ю. Карелии ( $R$ ,  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$ ), эмиссия  $\text{CO}_2$  из торфяной почвы ( $R_{\tau}$ ,  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$ ), поток  $\text{CO}_2$  из наземного опада ( $R_{\text{оп}}$ ,  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$ ), рассчитанные по моделям (2,3)

Месяц	Естественное болото				Осушенное болото				
	Ковер				Кочка	Ковер			
	R	$R_{\tau}$	$R_p$	$R_{\text{оп}}$	R	R	$R_{\tau}$	$R_p$	$R_{\text{оп}}$
Июнь	141,8	44,8	29,3	68,3	85,3	237,4	55,7	67,2	115,2
Июль	96,5	57,8	38,7	-	217,8	206,6	86,9	119,7	-
Август	96,2	52,1	42,1	-	166,8	165,3	74,1	91,2	-
Сентябрь	31,2	29,1	2,1	-	59,2	119,1	52,8	66,3	-
Сум., $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	365,7	183,8	114	68,3	529,1	724,5	269,5	339,8	115,2

кочки происходит с большей интенсивностью по сравнению с дыханием растительного сообщества равнинного участка.

Для естественной и осушаемой части мезоолиготрофного участка интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  при разложении наземного растительного опада соответственно равна 2,2 и 4,1  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Средние за вегетационный период вычисленные значения дыхания торфа ( $R_T$ ) без учета вклада корней составили для естественного участка 1,56  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  и для осушаемого - 2,25  $\text{гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

До осушения около 70% выделения  $\text{CO}_2$  поступает за счет разложения органического вещества (потоки газа из торфяной залежи и опада). В результате осушения интенсивность дыхания растительного сообщества усиливается и доля выделения  $\text{CO}_2$  от минерализации снижается до 50% (Табл. 1).

### Глава 5. Диффузионный поток $\text{CO}_2$ из торфяной залежи

Диффузия газа в пористой среде описывается общим уравнением неразрывности:

$$\partial(\epsilon C)/\partial t = \partial/\partial z(D \partial C/\partial z) + V(z,t), \quad (4)$$

где  $C$  - концентрация углекислого газа в почвенном воздухе на глубине  $z$  в момент времени  $t$ ;  $D$  - коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$ ;  $\epsilon$  - пористость аэрации;  $V(z,t)$  - функция источника или стока (продуцирование)  $\text{CO}_2$ .

Для решения уравнения необходимы сведения о концентрации углекислого газа по глубине торфяной почвы и коэффициентах диффузии  $\text{CO}_2$  через слой торфа.

В корнеобитаемом слое торфяной залежи болота района ю. Карелии содержание  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе незначительно вследствие высокой степени аэрации, в среднем за теплый период года оно составляет 0,12 % от объема воздуха. На



глубине 15-20 см средние значения концентрации  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе торфяной залежи естественного участка возрастают до 0,44-0,63 %.

Содержание  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе осушенной части болотного участка в 3 раза превосходит концентрацию газа в неосушенном торфянике. Максимальное содержание  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе осушенного участка составляет 2,10-2,28 % на глубине 15-20 см.

В лабораторных условиях определен экспоненциальный характер зависимости эффективного коэффициента диффузии  $\text{CO}_2$  в корнеобитаемом слое сфагнового торфа от пористости аэрации торфа. Коэффициент диффузии углекислого газа из почвенного воздуха не изменяется после осушения торфяной залежи и зависит от объема порового пространства, свободного от почвенной влаги.

Используя данные опытов по коэффициентам диффузии  $\text{CO}_2$  в сфагнуво-переходном торфе различной плотности, степени разложения и пористости аэрации, данные наблюдений по градиенту концентраций  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе, можно послойно определить функцию "источник-сток" углекислого газа, как показателя интенсивности продуцирования газа.

На неосушенной части болота основное генерирование газа происходит в верхнем 5-см слое торфяной залежи, на осушаемой части - на глубине 15 см.

При объемной влажности сфагнуво-переходного торфа, близкой к 60% для всех торфяных слоев характерно уменьшение скорости генерирования углекислого газа связанное с увеличением объемов растворения  $\text{CO}_2$ . Увлажнение почвы до 70-75% создает более благоприятные условия для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и болотной растительности. Интенсивность биологической выработки  $\text{CO}_2$  начинает преобладать над иммобилизацией углекислого газ в процессе

растворения и сорбции газа и продуцирование  $\text{CO}_2$  достигает максимума.

Температурная зависимость интенсивности продуцирования  $\text{CO}_2$  более всего выражена в диапазоне объемной влажности торфа 60-70%. Максимум выработки углекислого газа торфяным слоем отмечен при температурах 13-15 °С.

Расчет эмиссии  $\text{CO}_2$  из торфа проводили по градиенту концентраций в приземном слое воздуха и на глубине 5 см. На осушенном участке в среднем различия между наблюдаемыми и расчетными значениями потоков  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи составили 40%. Поскольку при измерении эмиссии углекислого газа на месте установки камеры растительность и корни были удалены, а расчетный метод включает и вклад корневой системы, данную разницу потоков можно принять за корневое дыхание растительного покрова.

На естественном участке измеренные значения эмиссии  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи превышают расчетные значения диффузионного потока газа в среднем на 20%. Особенно значительна эта разница в период высокого уровня грунтовых вод. Объяснить ее можно, во-первых, неучетом в расчетном методе диффузионного потока растворенного углекислого газа, во-вторых, низкими концентрациями газа вследствие интенсивного воздухообмена между атмосферой и почвенным воздухом сфагнового очеса неосушенного болотного участка.

## **Глава 6. Оценка динамики диффузионного потока углекислотного газа из торфяника с использованием динамических моделей тепло - влаго - газопереноса**

Решение задачи по имитации содержания углекислого газа в торфяной почве и оценки потока  $\text{CO}_2$  из торфяной залежи в атмосферу при различных гидротермических условиях среды выполнена на основе комплексной модели продукционного процесса, разработанной под руководством Р.А. Полуэктова

(Полуэктов, 1991), алгоритма и программной реализации блока моделей для расчета переноса газа в почве (Толстогузов, 1992).

Для решения поставленной задачи использовали уравнения, описывающие два необратимых процесса - перенос углекислого газа в почвенном воздухе и влаге:

$$q_a = -D_a \text{grad} C_a + C_a u_a \quad (\text{а}) \quad \text{и} \quad q_w = -D_w \text{grad} C_w + C_w u_w \quad (\text{б}). \quad (5)$$

где  $q_a, q_w$  - локальный поток углекислого газа в воздушной и водной среде;  $D_a, D_w$  - коэффициенты диффузии газа в воздушной и водной среде;  $C_a, C_w$  - концентрация углекислого газа в почвенном воздухе и влаге;  $u_a, u_w$  - скорости потоков воздуха и влаги в пористой среде. Первые слагаемые в уравнениях 5а и 5б отражают диффузионный поток газа, вторые - конвективный.

Базовая модель дополнительно к соотношению 5 включает в себя следующие уравнения:

■ скорость движения объемной фазы жидкости

$$u_w = -K_w(P_w) \partial \Psi_w / \partial x, \quad (6)$$

где  $K_w(P_w)$  - коэффициент влагопроводности;  $\Psi_w$  - полный потенциал почвенной влаги;  $x$  - координата границы слоя;

■ скорости фильтрации воздушной фазы

$$u_a = -K_a \eta_a^{-1} \partial P_a / \partial x, \quad (7)$$

где  $K_a$  - воздухопроницаемость;  $\eta_a$  - коэффициент вязкости воздуха;  $P_a$  - потенциал мобильной воздушной фазы;

■ динамики почвенной влаги

$$\mu(P_w) \partial P_w / \partial t = -\partial / \partial x (K_w(P_w) (\partial P_w / \partial x - 1)) + f_w, \quad (8)$$

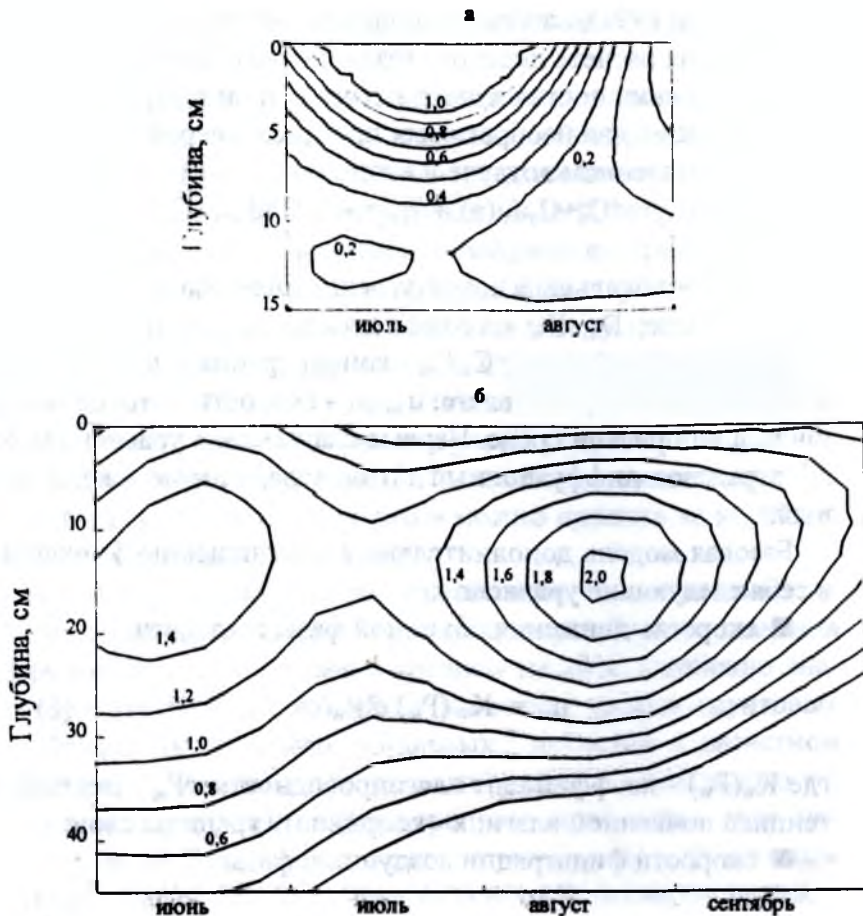


Рис. 3 Поле концентрации CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе торфа естественного (а) и осушаемого (б) мезоолиготрофного болотного участка

где  $\mu(P_w) = \frac{\partial w}{\partial P_w}$  - дифференциальная влагоемкость;  $P_w$  - потенциал тензиометрического давления;  $f_w$  - поглощение влаги корнями;

■ динамики почвенного воздуха

$$M/R' T \partial P_a \varepsilon / \partial t = -\partial/\partial x (\rho_a K_a / \eta_a \partial P_a / \partial x), \quad (9)$$

где  $M$  - молярная масса воздуха;  $R'$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - температура;  $\rho_a$  - плотность воздушной фазы.

Поля расчетных значений содержания  $CO_2$  в почвенном воздухе естественного и осушаемого мезоолиготрофного болота ю. Карелии представлены на рис. 3. Концентрация углекислого газа в воздухе верхнего 10-см слоя торфа в среднем составляет 1,0-1,2% по объему. Максимальные значения содержания  $CO_2$  (в среднем 1,4-2,0%) отмечены на глубине 15 см. Диапазон отклонений расчетных и экспериментальных значений составляет 8-13%, максимум - 30%.

Динамика рассчитанных по системе уравнений (5-9) значений диффузионного потока  $CO_2$  из торфяной почвы представлены на рис.4. При диапазоне изменений  $0,01-1,69 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  средняя за теплый период года эмиссия  $CO_2$  из сфагнового торфа осушаемой части болота составила  $0,83 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , что в 2,5 раза меньше значений, рассчитанных путем статистического (регрессионного) моделирования потока газа с двумя независимыми переменными: температурой воздуха и УГВ. Для естественного участка эта разница еще более существенна. Объяснить заниженные значения эмиссии  $CO_2$  из торфа, рассчитанные с использованием динамических моделей тепло- влагопереноса, можно неучетом в процессе моделирования конвективной составляющей переноса газа в почвенном слое и диффузионного потока растворенного газа.

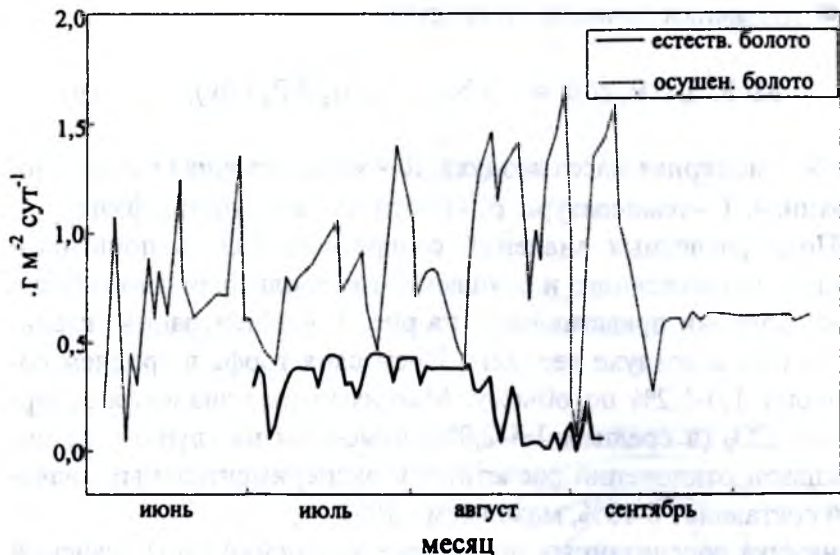


Рис. 4 Диффузионный поток CO<sub>2</sub> из торфяной залежи естественного (а) и осушаемого (б) мезоолиготрофного болотного участка района ю. Карелии

### Заключение

Исследования газового режима мезоолиготрофного болота показали тесную зависимость интенсивности дыхания торфяной почвы и экосистемы в целом от гидротермических условий среды.

В условиях южной Карелии в результате мелиоративного осушения мезоолиготрофного болота в первую очередь изменяется гидрологический режим - понижается уровень грунтовых вод, уменьшаются коэффициенты фильтрации.

Улучшение условий аэрации осушаемого болота приводит к вовлечению в процессы продуцирования углекислого газа глу-

бинных, малоактивных до осушения торфяных слоев. Количество  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе осушенной части болотного участка в 3 раза превосходит концентрацию газа в неосушенном торфянике.

Корреляционный анализ показал наличие тесной положительной связи содержания  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе с объемной влажностью торфа на естественной части ( $r = 0,88$  на глубине 15 см) и температурой торфа на осушаемой части болота ( $r = 0,70$  на глубине 20 см).

В объеме продуцированной торфяной залежью двуокиси углерода корневое дыхание кустарничково-травяно-мохового растительного покрова составляет около 40%.

В начале вегетационного периода основная доля в выделении углекислого газа болотной экосистемой приходится на эмиссию газа из разлагающегося растительного опада прошлого сезона.

При увеличении температуры интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  экосистемой мезоолиготрофного болота возрастает экспоненциально. Температурная зависимость валового дыхания болота более сильная на осушаемом участке, по сравнению с естественным.

Прогнозируемое потепление климата отразится на интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  осушаемых торфяников более значимо в сравнении с естественными. На естественном мезоолиготрофном болоте повышение средних температур увеличит интенсивность валового дыхания экосистемы только в период низкого стояния грунтовых вод. Опускание уровня грунтовых вод на 5-10 см в среднем за теплый период мало повлияет на суммарный поток  $\text{CO}_2$  за сезон, произойдет только перераспределение его интенсивности внутри сезона.

Расчетными методами определено, что в результате осушения интенсивность продуцирования углекислого газа в корнеобитаемом слое торфяной залежи увеличивается в 5-10 раз,

максимум выработки газа смещается с уровня сфагнового очага на глубину 15-20 см.

На естественном мезоолиготрофном болотном участке при максимальном опускании УГВ (20-25 см от поверхности) вследствие пересыхания верхних слоев торфяной залежи происходит угнетение корневой системы и почвенных микробных популяций. Это сопровождается снижением скорости продуцирования углекислого газа. Осушение болота улучшает условия аэрации и газообмена и максимальные значения выделения  $\text{CO}_2$  осушаемым участком мезоолиготрофного болота наблюдаются при УГВ равном  $30 \pm 3$  см.

Таким образом, проведенные исследования газового режима мезоолиготрофного болота свидетельствуют о том, что непосредственно после осушения торфяника интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  в атмосферу существенно сокращается, но по мере изменения физико-химических свойств торфа и растительного сообщества, они возрастают. В определенной мере потери углерода торфяником, после его осушения, компенсирует усиление фотосинтеза развивающегося растительного покрова. Об этом косвенно свидетельствует усиление интенсивности темнового дыхания болотной растительности и увеличение в 2 раза объема наземного опада.

### **Выводы**

1. Осушение безлесного мезоолиготрофного болота района юго-восточной Фенноскандии в течении 10 лет ведет к повышению в 2 раза интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  болотной экосистемой преимущественно за счет увеличения интенсивности темнового дыхания растительного покрова. Интенсивность эмиссии углекислого газа из торфяной залежи увеличивается в 1,5 раза.

2. До осушения около 70% выделения  $\text{CO}_2$  мезоолиготрофным болотом поступает за счет разложения органического ве-



щества. После осушения интенсивность темнового дыхания растительного покрова усиливается и доля выделения  $\text{CO}_2$  от минерализации снижается до 50%.

3. На естественном болотном участке основным фактором, определяющим скорость минерализации органического вещества и интенсивность дыхания корневой системы является увлажнение торфяной залежи. После осушения болота усиливается влияние температуры на процессы дыхания.

4. Зависимость общего выделения  $\text{CO}_2$  болотной экосистемой и эмиссии углекислого газа из торфяной почвы от температуры воздуха у поверхности болота и уровня грунтовых вод могут быть описаны математическими моделями типа квадратных полиномов, учитывающими взаимодействие факторов.

5. Максимальная интенсивность продуцирования  $\text{CO}_2$  корнеобитаемым слоем торфяной залежи отмечается при объемной влажности сфагнового торфа 70-75%.

6. При прогнозируемом рядом моделей потеплении воздуха на 2 °C суммарная за теплый период года эмиссия углекислого газа из торфяной почвы естественного болота может возрасти на 50%, на осушаемом - на 15%.

7. Диффузионный поток  $\text{CO}_2$  из почвенного воздуха в атмосферу составляет 40-50% от эмиссии газа из торфяной залежи. Предполагается, что остальной вклад в  $\text{CO}_2$  поток из торфа вносит конвективный перенос газа и конвективная диффузия растворенного  $\text{CO}_2$ .

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Икконен Е.Н., Толстогузов О.В, Силвола Ю. Концепция устойчивости  $\text{CO}_2$ -газообмена болота с атмосферой // Генезис, эволюция и роль болот в биосферных процессах. Тез. докл. междунар. конф. Минск, 1994 г. С.51-53.
2. Икконен Е.Н. К вопросу о точности измерения концентрации  $\text{CO}_2$  в воздушной пробе // Контроль состояния и

- регуляция функций биосистем. Петрозаводск. 1995. С.132- 134.
3. Икконен Е.Н. Динамика концентрации углекислого газа в почвенном воздухе верхового болота // Экология и география почв Карелии. Петрозаводск. 1995. С. 61-66.
  4. Икконен Е.Н. Интенсивность выработки углекислого газа торфяной почвой осушенного болота верхового типа // Тезисы докл. 3 Молодежной научной конференции Института биологии. Сыктывкар. 1995. С. 21-22.
  5. Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykanen H., Martikainen P. Reconstruction of annual carbon dynamics and balance for an oligotrophic pine fen // Northern peatlands in global climatic change. Publ. Academ. Finland. 1/96. EDITA, Helsinki, 1996. P. 77- 82.
  6. Икконен Е.Н. Влияние осушения на скорость  $\text{CO}_2$ -потоков из торфяной почвы верхового болота // Тез. докл. 2 Съезда почвоведов. 27-30 июня, 1996 г. С- Петербург. Книга 1, СПб, 1996. С. 170-171.
  7. Икконен Е.Н., Толстогузов О.В. Диффузия углекислого газа в торфяной почве верхового болота // Почвоведение. 1996. №7. С.868-872.
  8. Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykanen H., Martikainen P. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland // Oecologia. № 110. 1997. P. 423-431.
  9. 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  $\text{CO}_2$ -газообмен открытого участка олиготрофного болота // Экология. 1998. № 1. С. 14-18.
  10. Ikkonen E.N., Grabovic C.I.  $\text{CO}_2$  emission from a peat soil in Karelia (North-Western Russia) during Holocene // Abstr.

- Intern. Symp. On Paleosols and Climatic Change. 27-30 July, 1998. Lanzhou, P.R. China. P. 23.
11. Ikkonen E.N., Sidorova V.A., Kurets V.K. The effect of drainage on CO<sub>2</sub>-emission rate of a meso-oligotrophic peat soil in Southern Karelia (Russia) // Abstr. Intern. Symp. Chemical, Physical and Biological Processes in Peat soils. 23-27 August, 1999, Jokioinen, Finland. P. 82.
  12. Ikkonen E.N., Grabovic S.I. Estimated Holocene peat accumulation rates from CO<sub>2</sub> emissions, Karelia, North-Western Russia // Chinese Science Bulletin. Vol. 44. Supp.1. 1999. P. 200-204.
  13. Икконен Е.Н., Курец В.К. Оценка интенсивности темнового дыхания мохово-травянистого покрова мезоолиготрофного болота // Тез. докл. междунар. конф. "Физиология растений - наука 3 тысячелетия". 4 Съезд Общества физиологов растений России. 1999. Т.1. С. 51.
  14. Ikkonen E.N., Sidorova V.A., Kurets V.K. The effect of drainage on CO<sub>2</sub>- emission rate of a meso-oligotrophic peat soil in Southern Karelia (Russia) // Suo (Mires and peat). 2000. № 50. (In press).
  15. Икконен Е.Н., Курец В.К., Грабовик С.И., Дроздов С.Н. Гидротермические зависимости интенсивности углекислотного потока в атмосферу из мезоолиготрофного болота южной Карелии // Экология. (В печати).
  16. Икконен Е.Н., Сидорова В.А. Применение динамических моделей при оценке интенсивности эмиссии углекислого газа из торфяных почв // Экологические функции почв восточной Фенноскандии. Петрозаводск. 2000. (В печати).