

На правах рукописи



**КОНОНОВ Александр Васильевич**

**ЭМИССИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА  
МЕРЗЛОТНЫМИ ПОЧВАМИ ЛИСТВЕННИЧНЫХ ЛЕСОВ  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

03.00.16 - экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Якутск 2006

Работа выполнена в лаборатории экологической физиологии и биохимии растений Института биологических проблем криолитозоны СО РАН

Научный руководитель: кандидат биологических наук  
Максимов Трофим Христофорович

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор  
Саввинов Дмитрий Дмитриевич

кандидат биологических наук  
Давыдов Валерий Алексеевич

Ведущая организация: Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 10.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.306.03 при Якутском государственном университете им. М.К. Аммосова по адресу: 677891, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Якутского государственного университета им. М. К. Аммосова.

Автореферат разослан «23» ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Н.С. Данилова

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В последнее время внимание мировой общественности привлекает процесс увеличения содержания в атмосфере «парниковых» газов (метана, двуокиси азота и особенно углекислого газа), который считается одной из причин наблюдаемого изменения климата (IPCC-WGI, 2001). Существует множество свидетельств того, что северные регионы, в особенности таежные области Сибири, являются стоком углерода (Schulze et al., 1999; Dolman et al., 2004; Максимов и др., 2005б и другие) и играют существенную роль в дальнейшем развитии ситуации. Для понимания роли процессов, ведущих к трансформированию экосистем, необходимо определить баланс углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и углерода (С). Это особенно важно, имея в виду факт принятия ООН Международной конвенции по изменению климата (The United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992) и недавней ратификации (2005 г.) Российской Федерацией положений Киотского протокола (Kyoto protocol, 1997).

Почвенное дыхание (эмиссия углекислого газа почвами или поток  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы, далее Fs), является ключевым компонентом чистого экосистемного обмена углерода (далее NEE), представляя собой в сущности сумму величин дыхания почвенных микроорганизмов, грибов, фауны и корней растений, а также выделения углекислого газа в результате разложения органических остатков и химических реакций неорганических веществ, полученную в результате измерения эмиссии углекислого газа с единицы поверхности за определённое время.

Увеличение среднегодовых сумм положительных температур и количества осадков в результате прогнозируемых планетарных изменений климата неминуемо отразится на гидротермическом режиме почв в криолитозоне (Oechel et al., 1993; Gavrilova, 1993; Израэль и др., 1999; Stott et al., 2000). D.S. Schimel с коллегами (Schimel et al., 1994) подсчитали, что около 11 Гт углерода (0,5% всего мирового почвенного углерода) будет выброшено в атмосферу на каждый кельвин повышения температуры. Высокая температурная чувствительность почвенного дыхания является также одним из критических факторов в связи с современными изменениями климата. Реакция почвенного дыхания на повышение среднегодовых температур и увеличение количества осадков выразится в его усилении (Rustad, Campbell, Marion et al., 2000).

Почвенное дыхание в условиях многолетней мерзлоты имеет специфические для данной зоны малоизученные черты. По локальным участкам таежной зоны Восточной Сибири имеется относительно небольшое количество работ (Мазилкин, 1956; Коноровский, 1969, 1974, 1984; Поздняков, 1975; Саввинов, 1987; Schulze et al., 1999; Sawamoto et al., 2000; Lloyd et al., 2002; Максимов и др., 2005а; Koide et al., 2006; Hirano, 2006), в которых представлены результаты кратковременных исследований, носивших эпизодический характер и проводившихся на ограниченных территориях. Всё это совершенно недостаточно для полного

понимания картины современного состояния эмиссии углекислого газа почвами обширных таёжных экосистем.

Таким образом, для достоверной оценки баланса углерода в восточносибирской тайге необходимы долговременные измерения почвенного дыхания в типичных лесах с одновременным учётом факторов окружающей среды, влияющих на общий баланс углерода.

**Цель исследований** – оценить величины эмиссии углекислого газа почвами лиственничных лесов Центральной Якутии в разные по гидроклиматическим условиям годы.

**Задачи исследований:**

1. Описать зависимость почвенного дыхания от факторов окружающей среды (температура и влажность почвы, количество осадков);

2. Исследовать временную динамику эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами (суточный и сезонный ходы);

3. Рассчитать средний годовой баланс эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами.

**Научная новизна исследований.** Впервые на территории Центральной Якутии на основе комплексных долговременных исследований изучена эмиссия  $\text{CO}_2$  почвами лиственничных лесов. Рассчитаны годовые накопительные суммы выделения углекислого газа почвами. Определены закономерности и получены эмпирические уравнения зависимости эмиссии углекислого газа от температуры и влажности почвы. Выявлена роль осадков в суточной и сезонной динамике почвенного дыхания.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при оценке роли лиственничных лесов в общем балансе углерода лесных мерзлотных экосистем, для расчета государственных квот в реализации Российской Федерацией положений Киотского протокола.

**Защищаемые положения.**

1. Температурная чувствительность эмиссии  $\text{CO}_2$  почвой в лиственничных лесах региона зависит от влагообеспеченности верхних слоёв почвы.

2. Суточная кривая почвенного дыхания в Центральной Якутии имеет U-образную форму. Максимум эмиссии углекислого газа отмечается с середины июля до середины августа, когда температура почвы достигает наибольших значений.

3. Увеличение средних сезонных величин температуры и влажности почвы сопровождается значительным (в 1,5 раза) возрастанием количества углекислого газа, выделяемого почвой за сезон.

**Апробация работы и публикации.** Результаты и основные положения диссертационной работы были представлены в виде устных и стендовых докладов на 1-м и 5-м Симпозиумах по совместным Российско-Японским исследованиям вечной мерзлоты в 1992-1994 гг. Якутск, 1995 г. и Цукуба, Япония, 1997 г.; на Третьей международной конференции «International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME», Чеджу, Корея, 1996 г.; на международном семинаре МСОП

(IUCN) "Стратегия сохранения, восстановления и устойчивого использования бореальных лесов", Якутск, 1996 г.; на Рабочем совещании "Assessment methods of forest ecosystem status and sustainability", Красноярск, 1999 г.; на Международных конференциях «Роль мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата», Якутск, 2000, 2002, 2006 гг.; на Рабочем совещании по российско-голландскому проекту PIN-Matra "Разработка стратегий устойчивого управления по сохранению углерода для экосистемы дальневосточной сибирской лиственницы на мерзлоте", Вагенинген, Нидерланды, 2003 г.; на I и II международных рабочих совещаниях «C/N2O/Energy balance and climate over boreal regions with special emphasis on eastern Eurasia», Якутск, 2005, Амстердам, Нидерланды, 2006. Автор является соавтором двух разделов в монографии «Спасская падь»: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов / А.Н. Федоров, Т.Х. Максимов, П.П. Гаврильев и др. – Якутск: Издательство ИМЗ СО РАН, 2006. – 210 с.

Основные положения диссертации опубликованы в 20 печатных работах, в том числе: 1 монография, 2 статьи в рецензируемых журналах, 13 – в иностранных печатных изданиях.

Всего автором опубликована 41 работа в российских и иностранных печатных изданиях.

**Организация исследований.** Работа проведена при поддержке международных научно-исследовательских проектов PIN-MATRA (Нидерланды), GAME-Siberia, IORGC и CREST (Япония).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, списка литературы и 5 приложений; изложена на 146 страницах, содержит 32 таблицы и 31 рисунок. Список литературы включает 121 наименование, в том числе 40 – иностранных авторов.

**Благодарности:** Автор глубоко признателен д.с.-х.н., профессору Б.И. Иванову и научному руководителю, к.б.н. Т.Х. Максиму за организацию и подготовку исследований. Автор приносит искреннюю благодарность всему коллективу группы экологии растений ИБПК СО РАН за поддержку в проведении полевых исследований, а также докторам Эдди Мурсу, Йону Элберсу и Йоханнесу Долману (Нидерланды), Такеши Ота, Таро Накаи и Хиронори Ябуки (Япония) за поддержку исследований и помощь в анализе данных.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА I. Дыхание почв в криолитозоне. Состояние вопроса.**

Рассмотрена история исследований почвенного дыхания в бореальных лесах Сибири и Якутии, проведенных в XX веке (Мазилкин, 1956; Поздняков, 1975; Коноровский 1969, 1974, 1984; Саввинов, Слепцов, 1987; Саввинов, 1988) и современные исследования (Yanagihara et al., 2000; Прокушкин и др., 2000; Sawamoto et al., 2000; Замолодчиков, 2000; Глаголев и др., 2001; Ларионова и др., 2001; Kononov et al., 2004, 2005; Максимов и др., 2005; Hirano et al., 2006; Федоров и др., 2006; Koide et al., 2006 и др.).

Рассмотрены эколого-климатические условия якутского сектора криолитозоны. Сделан краткий обзор особенностей лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr, здесь и далее авторство видов приводится по Черепанову, 1995), как доминантного вида в Центральной Якутии. Дана микробиологическая характеристика почв Центральной Якутии.

## ГЛАВА 2. Характеристика района и объектов исследований.

### Методы исследований

Исследования проводились в разные по гидрометеорологическим условиям годы (2001, 2004, 2005 и 2006 гг.) на лесной научной станции «Спаская Падь» в 40 км северо-восточнее Якутска (62° 15' с.ш., 129° 37' в.д.). Подробная природная характеристика района исследований приведена в работе «Спаская Падь: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов» (2006).

На территории стационара преобладают разновидности мерзлотных палевых осолоделых почв, занимающих ровные участки и пологие склоны, на долю этого типа почв приходится 4,06 км<sup>2</sup> или 73,2% общей площади. Почвы преимущественно развиты на породах легкого механического состава - древнеаллювиальных супесях. В них содержание физической глины в 2-3 раза меньше, преобладают фракции песка, и почвы характеризуются как супесчаные.

Древостой в основном представлен лиственницей Каяндера. Соотношение площади с преобладанием этой породы, сосны и березы на опытном участке близко к тому, которое наблюдается по Центральной Якутии. Изучаемый тип леса – лиственничник брусничный (Поздняков, 1975). Толщина подстилки колеблется от 2 до 7 см. Максимальная высота деревьев составляет 27,7 м, что в 1,5 раза выше средней высоты лиственничного древостоя (16,7 м). Листовой индекс на исследованном участке равен 1,4.

Сделан обзор гидрометеорологических условий в годы исследований. Количество осадков в 2001 и 2004 гг. было сравнительно малым, во влажные 2005 и 2006 гг. температура была выше.

Рассмотрены использованные методы исследований. Почвенное дыхание и сопутствующие факторы окружающей среды измерялись с помощью автоматической системы почвенного дыхания (Automatic Soil Respiration System, ASRS), созданной по нашему заказу в НИИ Alterra, Нидерланды. Система ASRS состоит из блока управления и контроля и четырех почвенных камер, каждая из которых имеет соответствующие сенсоры почвенной температуры и влажности. Также имеется автоматический дождемер. Были проведены контрольные сравнительные исследования портативным газоанализатором EGM-4 с почвенной камерой SRC-1 (PP Systems, Великобритания), которые показали хорошее соответствие показаний обеих систем.

Первичная обработка данных проводилась с помощью программного пакета MatLab версии 6.0.0.88 Release 12. Использовались М-модули, написанные автором при неоценимой поддержке и помощи Михила К. ван дер Молена

(Свободный Университет Амстердама, Нидерланды). Данные обрабатывались в среде электронной таблицы Microsoft Excel 2002 из пакета Microsoft Office с использованием макроса-дополнения XLSTAT-Про. Статистическая проверка данных велась в пакете Statistica 6.0 (StatSoft, США).

### ГЛАВА 3. Временная динамика дыхания почв

#### 3.1. Суточная динамика

Для сравнения суточного хода интенсивности почвенного дыхания нами по температурным условиям выбраны 3 временных интервала, каждый длительностью в 10 дней, в начале и конце (переход температуры почвы через 5°C), а также в середине (максимальные величины температуры почвы) вегетационного периода (DOY<sup>1</sup> 140-150, DOY 240-250, DOY 190-200, соответственно). Использовались почасовые величины, усредненные за декаду.

Суточные колебания дыхания почвы связаны с изменением активности биологических процессов в почве и скорости диффузии CO<sub>2</sub> в атмосферу под влиянием суточного хода температуры почвы и приземного слоя воздуха. На изученных почвах увеличение потока углекислоты в атмосферу наблюдается в основном в вечернее время (между 17 и 20 часами), достигая своего максимума в ночное и раннесуточное время в зависимости от условий увлажнения и температуры. За это время выделяется до 70-80% от суммарного суточного выделения CO<sub>2</sub>. В утренние часы (между 8 и 11 часами) эмиссия CO<sub>2</sub> вновь падает. Наименьший поток CO<sub>2</sub> в атмосферу из почв лиственный леса отмечается в основном в период между 10 и 17 часами. В целом суточный ход интенсивности почвенного дыхания в летние месяцы имеет U-образную форму, обратную суточному ходу температуры припочвенного слоя воздуха.

В сухом и холодном 2004 г. наблюдается наибольшая средняя величина повышения интенсивности почвенного дыхания на каждые 10°C (Q<sub>10</sub>): 3,64, тогда как в годы с наибольшими средними сезонными температурами почвы среднесезонные величины Q<sub>10</sub> существенно меньше. Дыхание почвы при 0°C (b<sub>0</sub>) выше всего в наиболее сухой год.

На суточный ход почвенного дыхания большое влияние оказывают осадки. Немедленно после выпадения осадков (через 1-3 часа, требующихся для появления ответа микроорганизмов на повышение влажности почвы в виде усиления интенсивности дыхания) выделение CO<sub>2</sub> почвами усиливается в 1,5-1,7 раз, а в ряде случаев и в 3 раза. В течение 2-3 дней влага, насытившая верхние горизонты почвы, испаряется; если температура почвы остаётся на том же уровне интенсивность дыхания почвы постепенно понижается, и к концу 3-го – 4-го дня приходит к начальному значению. Температура почвы в течение нескольких дней может измениться и тогда величины почвенного дыхания следуют тренду температуры. Анализ процентного отношения продолжительности и величины

<sup>1</sup> Day Of Year (англ. - день года) – порядковый день года, 1 янв. - №1, 31 дек. - №365 (366 в високосном году)

пиков, вызванных дождями, к общему сезонному тренду величин почвенного дыхания показывает, что пики занимают не более 10%, таким образом, практически не влияя на общий поток углекислоты из почвы. Выпадение примерно одинакового количества осадков ( $2-3 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) в сухие годы вызывает мощный ответ биологической активности почвы в виде гораздо более сильного повышения эмиссии углекислого газа почвами (на 24-30%), чем во влажные годы (на 10-15%).

### 3.2. Сезонная динамика

В 2001 г. максимальные величины эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами достигаются в третьей декаде июля ( $6,4-7,7 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). С этого момента почвенное дыхание снижается до середины сентября и постепенно прекращается в третьей декаде октября. В условиях низкой влажности почвы в середине лета редкие осадки вызывают резкое повышение дыхания почвы на  $1,2-3 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Сезонный тренд эмиссии  $\text{CO}_2$  практически параллелен ходу кривой температуры почвы, но мало зависит от влажности почвы. Повышение температуры почвы на  $3-4^\circ\text{C}$  вызывает немедленное увеличение скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами на  $2-3 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Одновременно со снижением общего тренда температуры и влажности почвы происходит и уменьшение почвенного дыхания. При переходе температуры почвы через  $0^\circ\text{C}$  в конце сентября биологическая активность почвы не затухает, так как полное промерзание деятельного слоя почвы происходит только в середине – конце октября.

2004 г. был более влажным и менее тёплым, чем 2001 г. Высокие величины почвенной влажности в начале сезона вызваны значительным количеством осадков, выпавших в сентябре предыдущего, 2003 г. (62 мм). Максимальные величины почвенного дыхания наблюдались во второй декаде августа (до  $5 \text{ мкмоль } \text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), с резким снижением в начале сентября в связи с понижением температуры и влажности почвы. Повышение биологической активности почвы в начале июня вызвано резким увеличением величин температуры почвы в это время. Локальные пики температуры почвы вызывают кратковременную активацию почвенного дыхания.

Во влажном и теплом 2005 г. сезонный ход эмиссии углекислого газа почвами в основном следует изменению температуры почвы. Локальные всплески почвенного дыхания связаны с увеличением влажности почвы, вызванным достаточно сильными дождями. Так, на 150-й и 157-й день года выпало 15,8 и 36,4 мм дождя в сутки, соответственно. Эти явления вызвали резкое повышение почвенной влажности (в 1,3 раза), и, как следствие, повышение биологической активности почвы в 1,7 раз на фоне стабильного тренда температуры почвы. Большое количество осадков на 157-й день года привело к достаточно длительному повышению влажности почвы, что вызвало стабильное повышение интенсивности дыхания.



В 2006 г. сразу обращает на себя внимание резкое повышение почвенной влажности до достижения практически полной влагоёмкости. Однако это произошло уже после того, как температуры почвы начали снижаться, и, таким образом, никак не повлияло на интенсивность почвенного дыхания. Общий сезонный ход кривой эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами следует тренду почвенной температуры. Отмечены высокие величины корреляции пиков почвенного дыхания с выпадениями осадков.

В середине сезона корреляция величин почвенного дыхания с изменениями температуры почвы наименьшая и практически равна коэффициентам корреляции с влажностью почвы, однако, как в начале, так и в конце сезона величина корреляции почвенного дыхания с температурой почвы более чем в 2 раза выше, чем в середине. Чем выше величина почвенной влажности, тем ниже коэффициент корреляции, и при величинах почвенной влажности более 16-20% (в зависимости от условий года исследований) коэффициент корреляции меняет знак, и корреляция становится отрицательной. Такая ситуация может быть вызвана понижением степени аэрации почвы при высокой почвенной влажности, и связанным с этим снижением дыхательной активности микроорганизмов и корней растений.

Максимальные величины эмиссии углекислого газа отмечаются с середины июля до середины августа, когда температура почвы достигает максимальных значений. Общий сезонный ход почвенного дыхания имеет картину, обратную сезонному тренду величин почвенной влажности. Осадки вызывают повышение влажности верхних слоёв почвы, что, в свою очередь, приводит к кратковременному повышению интенсивности дыхания почвы. Большие количества осадков в холодный период конца лета уже не влияют на общий сезонный ход почвенного дыхания. В начале сезона, когда увлажнённость верхних почвенных горизонтов ещё достаточно высока, температура почвы играет главенствующую роль. Во второй половине сезона, если выпадает недостаточное количество осадков, возрастает влияние почвенной влажности, но в годы с большим количеством осадков в конце июля – августе почвенная влажность не является лимитирующим почвенную биологическую активность фактором.

#### **ГЛАВА 4. Зависимость дыхания почв от экологических факторов**

Рассмотрены особенности регрессионного анализа закономерностей зависимости эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами от факторов окружающей среды. Для улучшения параметров регрессии нами было принято деление сезона на два периода.

Показано, что каждый год может быть разделен на два периода. Первый, от начала вегетационного периода до середины июля, период просушивания почвы после достижения почвой высокого влагонасыщения в весеннее время, в большой степени определяется осенними осадками предыдущего года. В это время идет повышение температуры почвы. Второй период начинается с конца июля и

продолжается до конца вегетационного периода. Он сопровождается понижением температуры почвы и повышением почвенной влажности в связи с началом дождей и подпиткой поверхностных слоев почвы водой от таяния вечной мерзлоты.

В итоге множественного корреляционного анализа получены модельные формулы, представленные в табл. 1, описывающие статистически достоверные зависимости интенсивности общего почвенного дыхания от температуры (Т) и влажности (η) почвы.

Таблица 1

Формулы, описывающие зависимости общего почвенного дыхания (Fs) от температуры (Т) и влажности (η) почвы

Годы, метеоусловия	Уравнение
2001, сильно засушливый, теплый	$F_s = 0,32 T + 0,29 \eta - 3,02$
2004, засушливый, холодный	$F_s = 0,32 T + 0,08 \eta - 0,74$
2005, увлажненный, теплый	$F_s = 0,62 T + 0,19 \eta - 4,30$
2006, сильно увлажненный, теплый	$F_s = 0,67 T - 0,01 \eta - 0,79$

Видно, что в годы с наименьшими средними сезонными количествами осадков степени влияния температуры и влажности почвы практически одинаковы, что видно, например, из коэффициентов регрессии частного уравнения для 2001 г.: 0,32 по Т и 0,29 по η. Во влажные годы влияние влажности почвы уменьшается в 2 раза. В переувлажненные и теплые годы, когда не наблюдается дефицит почвенной влажности, степень влияния температуры почвы на биологическую активность почвы резко (в 2 и более раз) возрастает, а степень влияния влажности почвы снижается с увеличением среднего сезонного количества осадков.

Получены следующие эмпирические уравнения зависимости интенсивности общего почвенного дыхания от температуры (Т) и влажности (η) почвы:

$$F_s = 0,32 T + 0,185 \eta - 1,88 \quad \text{— для сухих годов;}$$

$$F_s = 0,645 T + 0,1 \eta - 2,545 \quad \text{— для влажных годов.}$$

Вышеприведенные уравнения были проверены на реальных данных. Отклонения расчетных данных от реальных составили 3-6%. Статистическая достоверность моделей достаточно высока.

Полученные нами уравнения могут быть применены для предварительной оценки величин дыхания мерзлотных палевых осолоделых почв лиственничных лесов Центральной Якутии с использованием имеющихся данных лишь по температуре и влажности почвы, с доказанной высокой статистической верностью.

Из табл. 2 видно, что фактором, наиболее влияющим на эмиссию углекислого газа почвами лиственничного леса в Центральной Якутии, является температура почвы (коэффициент регрессии 0,90), а мощность фактора влажности

почвы в 3 раза меньше. Температура почвы влияет сильнее в первой половине, тогда как влияние влажности почвы усиливается во второй половине сезона по сравнению с первой. Условия почвенной влажности играют важнейшую роль в кратковременных масштабах (сутки, декады), но слабо влияют на годовое накопление выбросов  $\text{CO}_2$  почвой.

Таблица 2  
Стандартизованные коэффициенты регрессии для средних величин по температуре и влажности почвы

Параметр	Период 1	Период 2	Весь сезон
Температура почвы	0,89	0,74	0,90
Влажность почвы	0,15	0,28	0,30

### ГЛАВА 5. Баланс $\text{CO}_2$ в почвах лиственных лесов Центральной Якутии

Межгодовые вариации эмиссии углекислого газа почвами в виде нарастающей суммы накопления выбросов  $\text{CO}_2$  почвой показаны на рисунке.

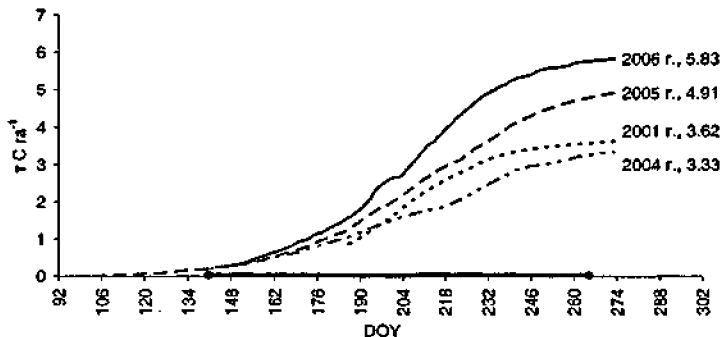


График накопления выбросов углекислого газа почвами лиственного леса, 2001-2005 годы, Спасская Падь. Жирная линия на оси абсцисс показывает продолжительность вегетационного периода.

Величина выделения  $\text{CO}_2$  почвами была максимальна в очень тепло и влажном 2006 г. и достигала  $5,83 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1}$ , а в менее влажном 2005 г. -  $4,91 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1}$ , в 2001 и 2004 гг. - соответственно  $3,62$  и  $3,33 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1}$ . Два последних года были похожими по относительной амплитуде гидроклиматических условий, за исключением того, что количество осадков в 2001 г. было почти в 2 раза меньше, чем в 2004 г., однако температура воздуха в 2001 г. была выше.

Таким образом, показано, что величины почвенного дыхания четко зависят от гидроклиматических условий года. Максимальные величины эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами наблюдаются во влажном и теплом 2006 г., несколько меньше - в 2005 г.,

когда количество осадков было меньше на 80%. В сухом, но теплом 2001 г. годовая эмиссия углекислого газа почвами на 20% превышает почвенное дыхание в достаточно влажном, но очень холодном 2004 году.

В табл. 3 представлены фрагменты температурной зависимости протекания физико-химических процессов в почвенном субстрате листовенничного леса при повышении температуры на каждые 10°C –  $Q_{10}$  и при 0°C –  $R_0$ , а также коэффициенты детерминации  $r^2$  в разные по гидроклиматическим условиям годы.

Таблица 3

Зависимость интенсивности почвенного дыхания листовенничного леса от температуры в разные по гидроклиматическим условиям годы. Спасская падь

Год	$Q_{10}$	$R_0$	$r^2$
2001, сильно засушливый	3,48	1,05	0,84
2004, засушливый	2,62	1,19	0,61
2005, увлажненный	6,13	0,69	0,79
2006, сильно увлажненный	6,92	0,72	0,86
В среднем за 4 года	4,79	0,91	0,78

Во влажные годы скорость протекания физико-химических процессов ( $Q_{10}$ ) в почве усиливается в среднем в 6,5 раза на каждые 10°C, тогда как в засушливые годы – в 3 раза.

Обратная картина наблюдается в отношении скорости протекания физико-химических процессов при 0°C ( $R_0$ ). При увеличении количества атмосферных осадков  $R_0$  уменьшается в 1,8 раза. Последнее может быть объяснено наличием сильной зависимости почвенного дыхания от температуры во влажные годы, чем в сильно засушливые.

Коэффициенты детерминации в крайне засушливые годы в среднем в 1,3 раза больше таковых увлажненных годов. В засушливые и влажные годы коэффициенты детерминации  $r^2$  составили 0,73 и 0,83 соответственно.

Как видно из табл. 4, максимальные выбросы углерода в атмосферу происходят в июле-августе, причем в сухом и теплом 2001 году максимум приходится на июль, а в более холодном 2004 году – на август. Величины потока углекислого газа из почв возрастают с увеличением среднего за сезон количества осадков.

Поток углекислоты из почвы в зимнее время не прекращается. Углекислый газ, накопившийся под промерзшим верхним слоем почвы, выбрасывается в атмосферу в период смыкания сезоннопротанвающей и многолетней мерзлоты по морозобойным трещинам (Ivanov et al., 1993, 1994, 1996; Иванов, Максимов, 1998; Maximov et al., 1999). При промерзании сезонно-талого профиля почвы, который в осенне-зимний период сильно насыщен углекислотой, происходит отжатие  $CO_2$  из промерзающего почвенного раствора с высокой концентрацией в нижнюю, не

успешную промерзнуть, часть профиля. В почвах немерзлых областей возможен отток газа вниз, за пределы промерзающего почвенного профиля, а также его сток в результате растворения грунтовыми водами. В криолитозоне эти процессы исключены. При смыкании двух фронтов мерзлоты происходит почти полная дегазация профиля, расположенного над многолетней мерзлотой, а накопившаяся углекислота по морозобойным крупным и мелким трещинам попадает в атмосферу и остается невостребованной ни растительностью, ни замерзшими водными экосистемами.

Таблица 4  
Выбросы углерода почвами лиственничных лесов по месяцам,  
Спаская Падь

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Сумма за сезон, т С · га <sup>-1</sup> ± станд. откл.
2001	–	–	<u>1,43</u> 39,5	<u>1,06</u> 29,3	<u>0,26</u> 7,2	3,68±0,08*
2004	<u>0,41</u> 12,4	<u>0,58</u> 17,4	<u>0,78</u> 23,4	<u>1,13</u> 33,9	<u>0,43</u> 12,9	3,23±0,21
2005	<u>0,33</u> 6,71	<u>0,77</u> 15,7	<u>1,56</u> 31,8	<u>1,53</u> 31,2	<u>0,72</u> 14,7	4,82±0,12
2006	–	<u>1,01</u> 17,3	<u>2,15</u> 36,9	<u>1,84</u> 31,6	<u>0,49</u> 8,4	5,56±0,37**

Числитель – значение выбросов, т С · га<sup>-1</sup>, знаменатель – доля от суммарного годового потока, %.

\* Включая предположительную оценку в 0,87 т С · га<sup>-1</sup> (24,1%) за май–июнь.

\*\* Включая предположительную оценку в 0,34 т С · га<sup>-1</sup> (5,8%) за май.

Наблюдаемое зимнее повышение концентрации CO<sub>2</sub> в приземном слое объясняется комплексом причин. Во-первых, отжатием CO<sub>2</sub> из промерзающего почвенного раствора (Ivanov et al., 1992; Федоров-Давыдов, Гиличинский, 1993); во-вторых, большим снижением скорости диффузии из-за образовавшейся корки льда и мерзлой почвы и, в-третьих, усилением дыхательной способности психротрофных микроорганизмов при околонулевых температурах при промерзании почвы (Федоров-Давыдов, Гиличинский, 1993). Поток углекислого газа из мерзлотной почвы усиливается также в апреле – мае, когда температура почвы начинает повышаться в пределах отрицательных значений в результате диффундирования CO<sub>2</sub> к поверхности почвы из заземленных мерзлотой пузырьков CO<sub>2</sub>.

## ВЫВОДЫ

1. Главным фактором, влияющим на интенсивность дыхания почв лиственничных лесов Центральной Якутии, является температура почвы, тогда как влажность верхних почвенных горизонтов является лишь дополнительным фактором, усиливающим почвенную температурную чувствительность. Осадки вызывают кратковременные пики выделения  $\text{CO}_2$  почвой, практически не влияющие на сезонный баланс выделения углекислого газа почвами, но сумма осадков за сезон является фактором, регулирующим итоговое количество выделенного почвами углекислого газа.
2. Получены эмпирические уравнения зависимости интенсивности общего почвенного дыхания ( $F_s$ ) от температуры ( $T$ ) и влажности ( $\eta$ ) почвы:

$$F_s = 0,32 T + 0,185 \eta - 1,88 \quad \text{— для сухих годов;}$$

$$F_s = 0,645 T + 0,1 \eta - 2,545 \quad \text{— для влажных годов.}$$

Данные уравнения могут быть использованы для предварительной оценки величин дыхания типичных почв лиственничных лесов Центральной Якутии на основе имеющихся данных по температуре и влажности почвы.

3. Кривая суточных колебаний дыхания почв лиственничных лесов в целом имеет U-образную форму с максимумом в вечернее и ночное время, и, соответственно, меньшей почвенной эмиссией углекислого газа в утреннее и дневное время. В сезонном ходе эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами максимум отмечается с середины июля до середины августа, когда температура почвы достигает наибольших значений.
4. Величины сезонного выделения углекислого газа почвой значительно повышаются с увеличением средних сезонных величин температуры и влажности почвы. В засушливых, но относительно холодных 2001 и 2004 гг. выделилось  $3,7 \pm 0,1$  и  $3,2 \pm 0,2$  т  $\text{C} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{сезон}^{-1}$ , соответственно. В теплые и увлажненные годы (2005 и 2006) интенсивность дыхания почвы возрастает в 1,2-1,7 раза (или на 65%), достигая  $4,8 \pm 0,1$  и  $5,6 \pm 0,4$  т  $\text{C} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{сезон}^{-1}$ , соответственно. Следовательно, при прогнозируемом повышении среднегодовых величин температуры и количества осадков в бореальном поясе почвенное дыхание лиственничных лесов Центральной Якутии в будущем может усилиться.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Ivanov B.I., Maximov T.C., Desyatkin R.V., Kononov A.V., Maximov A.P., Koike T. and Takahashi K. CO<sub>2</sub> emission by conifers and leaf-bearing forests of Yakutia // Proc. of Symp. on Joint Permafrost Studies between Japan and Russia in 1992-1994, held on 22-23 March, 1995, Yakutsk, Russia. – Yakutsk, 1995. – P.12-17.
2. Иванов Б.И., Максимов Т.Х., Кононов А.В., Максимов А.П. Баланс углерода в лесных экосистемах мерзлотной зоны // Тезисы докладов Первой Международной конференции Академии Северного Форума "Знание на службу народам Севера", 25-29 июня 1996 г., Якутск. – Якутск: Издательство "Северовед", 1996. – С. 33.
3. Максимов Т.Х., Кононов А.В. Роль лесных экосистем мерзлотной экосистемы в глобальном изменении климата // Материалы международного семинара МСОП (IUCN) "Стратегия сохранения, восстановления и устойчивого использования бореальных лесов", 16-17 декабря 1996 г., Якутск. – Якутск, 1996. – С.75-80.
4. Maximov T., Maximov A. and Kononov A. Balance of Carbon Dioxide and Water in Permafrost Ecosystems of Yakutia // Proc. The Third International Study Conference on GAWEX in Asia and GAME, held on 26-28 March, 1996, Cheju, Korea. – Cheju, 1996. – P.104-111.
5. Takahashi K., Koike T., Tabuchi R., Ota T., Maximov T., Kononov A., Maximov A., Chereomkin Y. and Ivanov B.I. Diurnal Change of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in Siberia Taiga during Growing Season at Yakutsk // Proc. of V Symp. on Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996, held on 27-28 January, 1997, Tsukuba, Japan. – Tsukuba, 1997. – P. 28-33.
6. Maximov T.C., Ivanov B.I., Kononov A.V and Maximov A.P. Structural-functional characteristics of forest and alas ecosystems of IGBP's Yakutian transect // Abstracts of Workshop "Assessment methods of forest ecosystem status and sustainability", held on 8-13 August, 1999, Krasnoyarsk, Russia. – Krasnoyarsk, 1999. – P.111.
7. Максимов Т.Х., Иванов Б.И., Долман А.Й., Мурс Е.Й., Максимов А.П., Кононов А.В., Ота Т., Хейман М. Баланс органогенного углерода в мерзлотных лесных экосистемах // Мерзлотные почвы: разнообразие, экология и охрана. – Якутск, 2004. – С.137-140.
8. Dolman A.J., Maximov T.C., Moors E.J., Maximov A.P., Elbers J.A., Kononov A.V., Waterloo M.J. and van der Molen M.K. Net ecosystem exchange of carbondioxide and water of far eastern Siberian Larch (*Larix Dahurica*) on permafrost // Biogeosciences. – 2004. – 1. – P. 275-309.
9. Maximov T.C., Dolman A.J., van der Molen M.K., Maximov A.P., Kononov A.V. The Carbon Dynamics of Permafrost-dominated Forest Ecosystems of the Yakutia Region in Russia // Conference on "Climate Disturbance Interactions in

- Boreal Forest Ecosystems", held on May 3-7, 2004, Fairbanks, Alaska, USA. – Fairbanks, 2004. – P. 138.
10. Kruijt B., Maximov A., Jans W., Kononov A., Maksimov T.C., Moors E. Changes in ecosystem photosynthesis in relation to climate in an East Siberian Larch ecosystem // Workshop on "C/H<sub>2</sub>O/ Energy Balance and Climate over boreal Regions with special emphasis on eastern Eurasia", held on October 25-27, 2004, Yakutsk, Russia. – Nagoya, 2004. – P. 29-32.
  11. Suzdalov D.A., Maximov T.C., Kononov A.V., Karsanaev S.V. Comparison of two systems (fix/mobile) of soil respiration measurements // Ibid. – P. 51-54.
  12. Molen M., Karsanaev S., Suzdalov D., Kononov A., Kraai A., Zeeman M.J., Maximov T.C., Dolman A.J. Energy and Carbon Fluxes on East Siberian Tundra // Ibid. – P. 71-74.
  13. Dolman A.J., Molen M., Moors E., Maximov A., Kononov A., Karsanaev S., Maximov T.C. Variability in the carbon and water fluxes of North East Siberian Larch // Ibid. – P. 79-82.
  14. Maximov T.C., Dolman A.J., Molen M., Moors E., Ohta T., Sugimoto A., Maximov A., Kononov A., Ivanov B. The Regional and Global Carbon scales of Permafrost-dominated forest ecosystems // Ibid. – P. 91-94.
  15. Kononov A.V., Maximov T.C., Moors E., Karsanaev S.V. Soil respiration on permafrost: far eastern Siberian Taiga // Ibid. – P. 95-98.
  16. Максимов Т.Х., Максимов А.П., Кононов А.В., Долман А.Й., Сугимото А., Мурс Э.Й., ван дер Молен М.К., Иванов Б.И. Эколого-физиологические особенности фотосинтеза лиственницы *Larix sibirica* в условиях многолетней мерзлоты Якутии // Лесоведение. – 2005. – №6. – С.3-10.
  17. Moors E.J., Dolman H., Maximov T.C., Jans W., Maximov A., Kononov A.V., Kruijt B. and Nabuurs G.J. Results of the PINMATRA project 2002-2004 // Proc. of 2nd Intern. Workshop on "C/H<sub>2</sub>O/Energy Balance and Climate over Boreal Regions with Special Emphasis on Eastern Eurasia", 26-29 January 2006, Amsterdam, Netherlands. – Nagoya, 2006. – P. 3-6.
  18. Kononov A.V., Maximov T.C., Suzdalov D.A. and Moors E. Seasonal trends of soil respiration in taiga permafrost regions of Central Yakutia // Ibid. – P. 49-52.
  19. van der Molen M.K., Dolman A.J. and TCOS-Siberia partners. Eddy fluxes of carbon dioxide obtained during TCOS-Siberia // Ibid. – P. 53-56.
  20. Максимов Т.Х., Долман А.Й., Мурс Э.Й., Максимов А.П., Элберс Й.А., Кононов А.В., Ватерлоо М.Й., ван дер Молен М.К. Спасская Падь: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2006. – С.139-153.



Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл.п.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 215.

**Учреждение «Издательство ЯНЦ СО РАН»**

677891, г. Якутск, ул. Петровского, 2,  
тел./факс: (411-2) 36-24-96  
E-mail: [kuznetsov@psb.ysn.ru](mailto:kuznetsov@psb.ysn.ru)

