

На правах рукописи

НАУМОВ Алексей Владимирович

ДЫХАНИЕ ПОЧВЫ: СОСТАВЛЯЮЩИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ,  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

03.00.27 – почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора биологических наук

Томск – 2004

Работа выполнена в лаборатории биогеоценологии  
Института почвоведения и агрохимии СО РАН

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук **Л.С.Шугалей**

доктор биологических наук **И.Н.Шарков**

доктор биологических наук, проф. **И.Н.Росновский**

Ведущая организация:

**Институт физико-химических и биологических  
проблем почвоведения Российской Академии наук**

Защита состоится « 27 » мая 2004 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.267.09 при Томском государственном  
университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36. Тел./факс 3822-  
529853

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского  
государственного университета.

Автореферат разослан « 15 » апреля 2004 года

Ученый секретарь совета,  
доктор биологических наук

С.П. Кулижский

Актуальность проблемы. Почвенное дыхание (дыхание почвы, почвенный газообмен) представляет собой один из основных процессов в глобальном цикле углерода на нашей планете. В научной литературе еще недостаточно раскрыта суть этого исключительного природного явления, его роль в биосфере. Даже на уровне отдельных почв или почвенных типов эколого-функциональные связи почвенного дыхания с факторами среды не систематизированы. Нет обобщающих публикаций. Сложившееся положение становится более понятно, если принять во внимание, что мы имеем дело с многогранным, многокомпонентным процессом. Чисто практический интерес к почвенному дыханию как показателю, характеризующему в какой-то мере биологическую активность почвы, не способствовал развитию более глубоких научных знаний в этой области.

Почвенный покров планеты, «геодерма», выполняет множественные экологические функции в биосфере, поддерживая постоянное взаимодействие, обмен веществом и энергией между атмосферой, поверхностными водами и литосферой. Современные экологические проблемы, одна из которых накопление парниковых газов в атмосфере и связанные с этим изменения окружающей среды и климата, поставили перед обществом ряд практических и научных задач. Слабая изученность функции почвенного газообмена, как на уровне отдельных структурных элементов – биогеоценозов, так и на уровне биосферы делает совершенно необходимыми исследования в этой области.

Представленная работа является обобщением знаний по «дыханию» почвы в различных природных и антропогенных экосистемах, а также содержит новые экспериментальные данные и теоретические разработки, которые заставляют пересмотреть некоторые положения, уже устоявшиеся в сфере системной экологии и почвоведения.

Цель и задачи исследования. Основная цель, поставленная в работе, состояла:

в разработке методологических и методических принципов и подходов экологического (биогеоценологического) направления в изучении почвенного дыхания и их апробации, основываясь на систематическом и разностороннем изучении  $\text{CO}_2$ -газообмена наиболее значимых в проблеме «парниковых газов» и углеродного баланса биосферы почвенных объектов.

В ходе исследований решались следующие задачи:

1. Выявить на основании анализа литературных данных наименее изученные аспекты газообмена целинных, техногенных и сельскохозяйственных земель;
2. Оценить существующие и разработать новые аналитические и полевые методики;

3. Оценить мощность биологического и биохимического источника углекислого газа в почвенном профиле;
4. Получить количественные характеристики потоков парниковых газов с поверхности почв в атмосферу;
5. Выявить специфику почвенного CO<sub>2</sub>- газообмена как фактора почвообразования;
6. Провести анализ состояния газовой фазы почв и выявить особенности профильного распределения углекислого газа и кислорода, как основных продуктов метаболизма почвенной биоты;
7. Выявить географические закономерности почвенного дыхания;
8. Разработать количественные критерии (экологический стандарт) для сравнения динамических характеристик почвенного газообмена разных объектов.

Научная новизна. Новизна работы состоит в переходе на новый методологический уровень, в соответствии с которым, почва рассматривается не как самостоятельное, обособленное естественноисторическое природное тело, а как динамический компонент биосферы (биогеоценоза). Такой переход потребовал отказаться от узкоспециального понимания термина «дыхание почвы»; в широком экологическом смысле он употребляется для выражения сложной, многофункциональной природы взаимодействий (на уровне газообразной субстанции) между основными компонентами биогеосферы.

Разработаны новые инструментальные методы определения содержания карбонатов и уреазной активности почвы. Получен патент Российской Федерации на устройство для измерения газообмена почвенных образцов. Показан возможный вклад биохимической составляющей в суммарную эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы. Использование тонких методов анализа и данных по газовому составу почвенного воздуха карбонатных почв позволили впервые показать почвообразующую роль карбонатной системы, рассчитать состояние основных ее компонентов для всего почвенного профиля. Таким образом, дискутирующийся долгое время вопрос о происхождении и динамике карбонатов в почвах субаридных территорий решен однозначно.

Впервые на основе единой полевой методики получены количественные оценки эмиссионных потоков парниковых газов в различных болотных ландшафтах лесной зоны Западной Сибири. Получены балансовые характеристики накопления углерода в современных торфяных отложениях. Построена новая концептуальная и математическая модель круговорота углерода в болотных экосистемах, учитывающая особенности распределения

потоков углерода в подземной сфере. Разработанная модель применима для органических и минеральных почв. Новый аспект в интерпретации биологического круговорота углерода позволит скорректировать глобальные модели динамики состава атмосферы, получить более адекватное представление о процессах происходящих в биосфере.

Защищаемые положения:

1. Дыхание почвы представляет собой сложное, многофункциональное природное явление, проявляющееся в процессах газообмена между основными компонентами биосферы, почвообразования, трансформации геологических пород, диссипации энергии, накопленной в почвенном органическом веществе и биомассе почвообитающих организмов.

2. Почвенный CO<sub>2</sub>- газообмен является мощным, постоянно действующим фактором почвообразования; современные карбонатные почвы субаридных территорий необходимо рассматривать как источник углекислого газа, поступающего в атмосферу.

3. Чистая первичная продукция болотной растительности не определяет величину входного потока углерода в экосистему, как считалось раньше; большая часть ее формируется за счет внутренних резервов углерода (торф, растительные остатки, углекислый газ, выделяющийся в процессе дыхания подземных органов растений). Наличие внутреннего цикла, сопряженного с процессами метаболизма растений, минерализации и трансформации органического вещества в подземной сфере, обеспечивает высокую степень замкнутости (автономности) и устойчивости болотной формации к изменениям концентрации углекислого газа в атмосфере.

Теоретическое и прикладное значение. Проведенные исследования вносят существенный вклад в теорию почвообразования, открывают новый взгляд на соотношение внутрипочвенных и геологических процессов. Выявленные пространственно-временные структуры газового профиля черноземных почв позволяют рассматривать почвенный покров как интегрированную, самоорганизующуюся систему. Предложенная концептуальная модель круговорота углерода является важной корректировкой фундаментального понятия системной экологии.

Разработанные инструментально-аналитические методы могут широко использоваться в лабораторной практике. Полученные оценки потоков парниковых газов и территориальные балансовые расчеты аккумуляции углерода в болотах Западной Сибири необходимы для составления карт размещения и мощности наземных источников и стоков наиболее активных загрязнителей атмосферы. Разделы диссертации, посвященные экологическим взаимосвязям дыхательного газообмена болотных растений и дыхания торфяных почв с факторами окружающей

среды, целесообразно использовать в лекционной работе и учебных курсах по экологии и почвоведению.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и были обсуждены на экологическом семинаре Лаборатории биогеоценологии ИПА СО РАН, Пятом Уральском совещании «Биологическая рекультивация нарушенных земель», Свердловск, ноябрь 1988 г.; Всесоюзном совещании по проблеме «Временная организованность геосистем» - «Геосистема – 90», Звенигород, май 1990 г.; на заседании Международного общества математической экологии Восточной и Центральной Европы (ECESME), Днепропетровск, декабрь, 1995 г.; на Первой международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие: загрязнение окружающей среды и экологическая безопасность», Днепропетровск, декабрь, 1995 г.; Второй международной конференции «Sustainable development: System analysis in ecology», Sevastopol, Ukraine, September, 1996; на Рабочем совещании по проблеме «Климаты и цикл углерода: прошлое и современность», Москва, 1998; Национальной конференции с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии», Пущино, ноябрь 2000 г.; Международном полевом симпозиуме «West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present», Noyabrsk, August 2001; Третьей Всероссийской научной экологической конференции с международным участием «Чтения памяти Ю.А.Львова», Томск, сентябрь 2002; расширенном заседании кафедры ботаники ТГУ, Томск, март 2003 г.; Второй Международной конференции «Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии», Пущино, июнь 2003 г.

Основные результаты исследований по теме диссертации отражены в 1 монографии, 23 статьях и 1 патенте Российской Федерации.

Вклад автора в разработку проблемы. Представленные в работе экспериментальные данные, идейные находки, методические и методологические разработки, теоретические обобщения принадлежат диссертанту.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 317 страниц формата А4, включая 36 таблиц и 50 рисунков. Список использованной литературы насчитывает 398 работ, в том числе 100 на иностранных языках.

## 1 ПРИНЦИПЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе используется биогеоценологический (экологический) подход к исследованию почвенного дыхания. Его суть состоит в том, что почва рассматривается не как обособленное биокосное тело, а как динамический компонент биосферы (биогеоценоза). В этом разделе сформулированы

основные методологические принципы почвенно-экологических исследований. В связи с относительной молодостью экологической парадигмы в почвоведении формирование основополагающих понятий является первым и необходимым шагом в развитии нового направления.

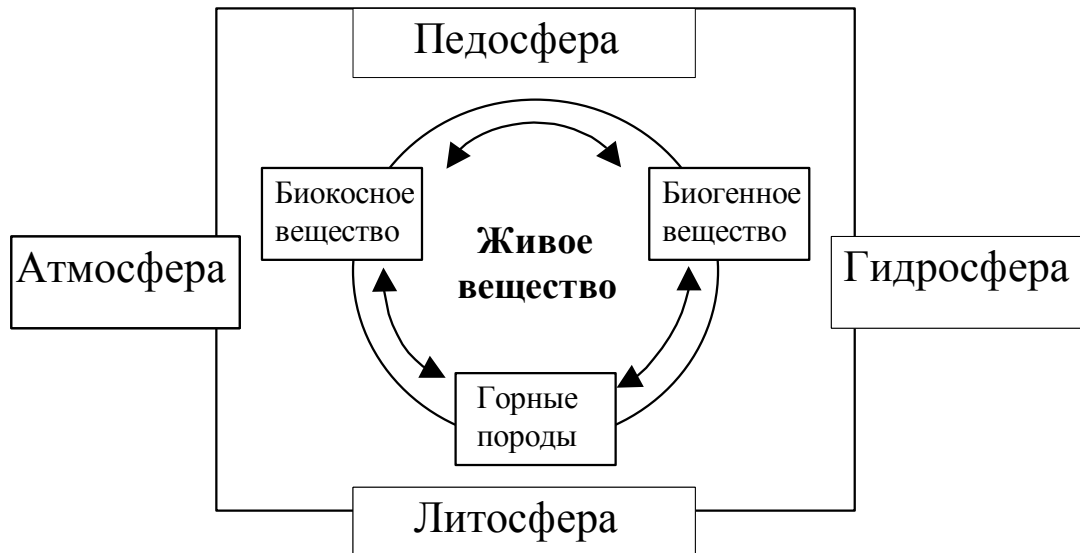


Рис. 1 Схема взаимодействия элементов почвообразовательного процесса

Экологический подход является естественным логическим продолжением идей В.В.Докучаева о всеобщей взаимосвязи явлений на земной поверхности и его талантливого продолжателя В.И.Вернадского о почве, как продукте взаимодействия живой и косной материи. Поэтому один из основных принципов этого направления назван нами «принципом биоцентричности почвообразования», который схематично иллюстрирован на рисунке 1. Таким образом, мы вновь возвращаемся к понятию биологического почвообразования, сформулированного в работах А.А.Роде, В.В.Пономаревой, А.А.Завалишина, С.В.Зонна и некоторых других известных почвоведов еще в середине прошлого века и несправедливо оставленного без должного внимания. Также имеются основания считать, что взаимодействие между живым и косным веществом (биосферой и литосферой) представляет собой саморегулируемый процесс самого высокого иерархического уровня, осуществляемый в разных масштабах времени. В связи с этим почва рассматривается как интегрированная, иерархическая система, к которой может быть применен системный анализ («принцип иерархичности почвообразования»). Фактически, при переходе от нижнего иерархического уровня к более высокому уровню никогда не наблюдается деградация биологического компонента. Эту особенность почвообразования отражает «принцип биологической непрерывности почвообразовательного процесса». Формирование и развитие почвы изначально происходит в неоднородной географической среде (высотная и

широтная зональность, слоистость геологических пород и прочие), которую создают многочисленные экологические факторы и их градиенты. Таким образом, основную группу методологических принципов, характеризующих специфику почвенно-экологических исследований, замыкает «принцип структурированности географического пространства».

Переход на новый методологический уровень потребовал отказаться от узкоспециального понимания термина «дыхание почвы». В широком экологическом смысле дыхание почвы определено как сложное, многогранное, многокомпонентное, многофункциональное природное явление, проявляющееся в процессах газообмена между основными компонентами биосферы, почвообразования, трансформации геологических пород, диссипации энергии, накопленной в почвенном органическом веществе и биомассе почвообитающих организмов.

## 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По традиции отдельный раздел диссертации посвящен описанию объектов исследования, полевых методов и лабораторных методик. Автором разработаны и апробированы на фактическом материале новые, оригинальные методы определения карбонатов и уреазной активности почвы с использованием инфракрасного газоанализатора, дается подробное описание лабораторной установки и хода анализа. Описаны процедуры статистической обработки данных.

Выбор объектов исследования определялся их значимостью в проблеме парниковых газов и степенью изученности почвенного газообмена:

### *2.1 Экосистемы техногенных ландшафтов*

Значительные нарушения естественного почвенного покрова происходят в результате открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Изучение почвенного дыхания в техногенных экосистемах проводится очень редко. Немногочисленные данные по биологической активности верхнего слоя почвообразующего субстрата не дают представления о формировании функции  $\text{CO}_2$ -газообмена в условиях техногенеза. Систематическое исследование углекислотной составляющей почвенного дыхания в условиях техногенного ландшафта угольных разрезов Канско-Ачинского месторождения было проведено на отвалах первичного (терриконы) и вторичного (после повторного выравнивания) зарастания. В качестве возможной терминальной стадии сукцессии рассматривались естественные луговые экосистемы (почвы).

Интенсивность дыхания почвы (почвенного субстрата) определяли по выделению углекислого газа отдельными почвенными образцами (диаметр 80, высота 120 мм), которые отбирали в поле с помощью специально сконструированного пробоотборника послойно до глубины 36 см (0-12, 12-24 и 24-36 см) без нарушения их естественной структуры (Наумов, 1993).



Повторность отбора проб четырехкратная. Параллельно с отбором проб измеряли температуру почвы на глубине 5, 10, 20, 30, 40 и 50 см с помощью полевого прибора ТЭТ-2. Наблюдения проводились в основном в теплый период вегетационного сезона. Влияние переходных процессов на выделение  $\text{CO}_2$ , возникающих в межсезонье при оттаивании и промерзании почвы, в данном разделе не рассматривалось.

Интенсивность дыхания почвы измеряли в открытой газометрической системе с помощью инфракрасного газоанализатора «Инфралит 5» со шкалой 0-0,1 %  $\text{CO}_2$ . Способ отбора проб в полевых условиях и конструкция экспозиционной камеры ЭК позволяли регистрировать поток углекислого газа, выделяющегося с поверхности образца, а также оценивать скорость его продуцирования в расчете на единицу массы почвенного монолита. В ходе лабораторного эксперимента образцы помещали в экспозиционную камеру после предварительной адаптации к окружающим условиям. Перед измерением удаляли слой подстилки и все надземные части растений, чтобы снизить вариабельность изучаемого показателя (Синкевич, 1970; Титлянова, Тесаржова, 1991). Температуру образцов контролировали по показаниям термометра, вмонтированного в крышку ЭК, ртутный шарик которого контактировал с почвой в средней части монолита. Влажность почвы определяли весовым методом после измерения дыхания.

## *2.2 Черноземные почвы агроландшафтов*

Почва издавна используется человеком для выращивания различных сельскохозяйственных культур с целью удовлетворения важных жизненных потребностей. Введение в практику интенсивных технологий вместе с положительным экономическим эффектом привело к серьезным экологическим проблемам. В частности, парниковый эффект может быть прямо связан с нестационарным режимом функционирования агроэкосистем: значительное снижение содержания гумуса, сдвиг равновесия почвенной карбонатной системы, изменение биологической активности почв (Наумов, 1988; Заварзин, 1994; Титлянова, Наумов, 1995). Поэтому другую группу объектов, заслуживающую внимания в связи с накоплением углекислого газа в атмосфере, составляли черноземные почвы, сформированные на карбонатных породах и находящиеся в сельскохозяйственном использовании. Эта работа проводилась на примере черноземных почв Новосибирского Приобья. Были изучены чернозем обыкновенный  $\text{ЧО}_{\text{ц}}$  и черноземно-луговая почва  $\text{ЧЛ}_{\text{ц}}$  (сенокос), чернозем выщелоченный (залежь  $\text{ЧВ}_3$  и пашня  $\text{ЧВ}_{\text{оп}}$ ). Особое внимание уделялось функционированию их карбонатной системы.

Газовый состав почвенного воздуха изучали с помощью модифицированного метода трубок. Для анализа почвенного воздуха на содержание  $\text{CO}_2$  использовали инфракрасный газоанализатор «Инфралит 5» (ИКГ), включенный по абсолютной схеме. Кювета сравнения заполнялась

очищенным от углекислого газа и паров воды воздухом. Калибровка прибора проводилась импульсным методом, путем ввода определенных количеств чистой  $\text{CO}_2$  в измерительный канал.

Содержание кислорода в пробах определяли на газовом хроматографе ЛХМ-80 с детектором по теплопроводности. Для разделения компонентов газовой смеси использовалась насадочная колонка 1 м x 2 мм СаА 0,16-0,20 мм. Температурный режим детектора 130, испарителя 80, колонки 90 °С. Газ-носитель гелий.

Дыхание почвы измеряли камерным и диффузионным методом. В первом случае пробы отбирали почвенным буром (по 10 см) до глубины 60 см. Измерения проводили в замкнутых камерах объемом 450 см<sup>3</sup> в условиях полевого стационара. Во втором случае (диффузионный метод) скорость эмиссии оценивали по разности концентраций  $\text{CO}_2$  в приземном слое воздуха и в почве на глубине 20 см, используя для расчета общее уравнение диффузии газа в пористой среде (Воронин, 1986; Смагин, 1999; Campbell, 1985; Richter, 1987). Основные показатели водно-физических и химических свойств почв определяли по общепринятым методикам (Александрова, Найденова, 1986).

### *2.3 Болотные экосистемы*

В связи с необходимостью инвентаризации основных наземных источников углекислого газа и метана исследования газообмена торфяных болотных почв представляются особенно актуальными. Болота Западной Сибири – самый крупный и малоизученный в этом отношении болотный массив планеты. Исследования эмиссии парниковых газов начались здесь в 1993 году и были ограничены подзоной южной тайги. Была поставлена задача: продвинуться дальше на север и исследовать болотные ландшафты средней и северной тайги. Особенностью последних является широкое распространение многолетней мерзлоты.

В соответствии с зональной структурой распределения болот в качестве основополагающего использовался метод ключевых участков. В пределах каждого ключевого участка, характеризовавшего наиболее распространенный тип болотного ландшафта северной, средней и южной тайги, проводили измерения потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  с поверхности разных болотных экосистем. Полигоны для наблюдений располагались в районе населенных пунктов Ноябрьск (63°10' N, 75°30' E), Нижневартовск (60°56' N, 76°50' E), Плотниково (56°50' N, 82°50' E). Измерения проводились в летний период на следующих объектах: 1) на омбротрофном болоте с грядово-мочажинно-озерковым комплексом по периферии в сосново-кустарничково-сфагновом (СКС) и осоково-сфагновом (ОС) сообществах, омбротрофном плоскобугристом болоте на мерзлоте (ПБМ) и мезо-олиготрофной, минеротрофной осоково-сфагновой топи (ОСТ) в долине небольшой речки Янга-Яха (северная тайга, 1999); 2) на омбротрофном болотном массиве с

грядово-мочажинно-озерковым комплексом в центральной части и топяными комплексами по периферии и на границе с минеральными островами в сосново-кустарничково-сфагновом (СКС), осоково-сфагновом мочажинном (ОС) и осоково-сфагновом топяном (ОСТ) сообществах, на минеротрофном болотном массиве у южного склона Аганской возвышенности в кустарничково-осоково-сфагновом топяном сообществе (КОСТ) (средняя тайга, 2001); 3) на периферии омбротрофного болота с грядово-мочажинным комплексом в кустарничково-осоково-сфагновом (КОС) и осоково-сфагновом (ОС) сообществе (южная тайга, 2000).

Эмиссию углекислого газа и метана измеряли камерным статическим методом в течение светлого времени суток с интервалом 3-3,5 часа. В отдельные сроки проводили полевые измерения эмиссионных потоков на протяжении всего суточного цикла. Общий объем экспозиционной камеры составлял 2 л, площадь основания 100 см<sup>2</sup>. При измерении суммарного дыхания камеры накрывали плотным чехлом с отражающим покрытием из алюминиевой фольги. В ходе экспозиции отбирали шприцем три пробы с интервалом 10 мин. После этого чехол снимали и через такое же время отбирали четвертую пробу. Для расчета потоков углекислого газа и метана использовали стохастическую диффузионную модель (Pedersen et al., 2001) и обычное уравнение линейной регрессии, что позволило повысить достоверность результатов. Оценки скорости нетто-ассимиляции рассчитывали по изменению концентрации углекислого газа внутри экспозиционных камер при естественном освещении после удаления защитного чехла. Анализ газовых проб проводили на хроматографе «Кристалл 5000» с пламенно-ионизационным детектором и метанатором (СКБ «Хроматэк», Россия). В измерительном комплексе использовалась насадочная колонка М-3м x 2 мм с Porapak N 80/100 при температуре 60 °С, газ-носитель аргон.

Отбор болотной воды осуществлялся с разных глубин с помощью латунной трубки. Анализ состава растворенных газов проводился хроматографически по описанной выше методике после их вытеснения насыщенным солевым раствором или установления газового равновесия в среде с аргоном. В расчетах использовались справочные данные по физическим свойствам газов.

### 3 КОМПОНЕНТЫ И ПРОЦЕССЫ ПОЧВЕННОГО «ДЫХАНИЯ»

Почва, в современном понимании, является динамическим, многофазным биокосным элементом биосферы, находящимся в постоянной взаимосвязи и взаимодействии с геологическими породами, природными водами и атмосферой. Почвенное «дыхание» составляет одно из звеньев в цепи глобального биогеохимического круговорота углерода и кислорода. Термин «дыхание почвы» (или почвенное «дыхание») вошел в употребление как один из показателей почвенного газообмена. Стремление отразить

разные стороны многосложного природного процесса образования и выделения, перемешивания, перемещения и поглощения газов внутри почвы и их обмен с атмосферой привело к использованию одного и того же термина в разных аспектах. Им обозначают ритмичный воздухообмен между почвой и атмосферой, происходящий под влиянием изменений температуры почвы и атмосферного давления, суммарное выделение углекислого газа с поверхности почвы (эмиссия), микробиологическую (биохимическую, биологическую) активность почвы, скорость минерализации почвенного органического вещества (Толковый словарь ..., 1975; Быков, 1988). Многообразие смысловых вариантов термина «дыхание почвы» делает совершенно необходимым условием для научных публикаций четкое описание объема используемого понятия.

Целесообразно выделять биологические, биохимические, почвенно-физические и геологические факторы и процессы почвенного дыхания. Они по-разному проявляются в почвах различного генезиса. Наименее изучены почвенно-физические и геологические составляющие газообмена. Роль почвенной ферментативной системы в газообмене также остается, фактически, не исследованной. Биоценоз и почвенные ферменты (энзимы) составляют единую буферную систему. Ее компоненты, по-видимому, дополняют друг друга функционально, определяя специфику гумусообразования, трансформации и минерализации почвенного органического вещества (Мишустин, 1949; Наумов, 1994).

Одна из задач изучения почвенного дыхания состоит в оценке вклада разных групп живых организмов в  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  газообмене с атмосферой. Однако имеется ряд методических трудностей, ограничивающих достоверность получаемых результатов. Большое влияние на газовый режим почвы (состав почвенного воздуха, его динамику, выделение углекислого газа и поглощение кислорода) оказывают подземные органы растений. Особое место в  $\text{CO}_2$ -газообмене с атмосферой занимает почвенная карбонатная система. Ее функционирование определяется комплексом межфазных физических и физико-химических процессов, сопряженных с химическими превращениями в поровом растворе и ионообменными реакциями с минеральной и органо-минеральной частью почвы.

### *3.1 Почвенно-физические и геологические составляющие газообмена в биогеоценозах*

Физическое состояние почвы в каждый конкретный момент времени определяется количественным соотношением и характером взаимодействия между газообразной, твердой и жидкой фазой. При постоянной мощности внутрипочвенных источников и стоков газообмен с атмосферой будет зависеть от физической природы сил поверхностного взаимодействия и механизмов массопереноса в жидкой и газовой среде. При обычных колебаниях температуры почвы и атмосферного давления воздухообмен

(замещение верхних слоев почвенного воздуха атмосферным) может составить 2-7 % (Смагин, 1999). Поэтому в большинстве случаев этой составляющей дыхания почвы, по-видимому, можно пренебречь.

Механизм молекулярной диффузии газов в почвах считается преобладающим. Тем не менее, имеются отдельные факты трудно объяснимые с позиций этой теории. В частности, в черноземных почвах Приобья, обладающих высокой биологической активностью, наблюдалась высокая концентрация кислорода в газовой фазе по всему профилю (глава 5), что допускает существование других процессов массообмена, отличных от обычной диффузии. В качестве альтернативы могут рассматриваться конвективный циркуляционный перенос (Смагин, 1999) или неизотермический ротационный воздухообмен (Гольдман и др., 1987).

Интенсивность сорбционных процессов в почве может преобладать над интенсивностью биологических процессов продуцирования углекислоты и поглощения кислорода, что будет проявляться в высоких значениях температурных коэффициентов почвенного дыхания в условиях неизотермического проведения экспериментов (Турлюн, 1957). Низкие значения дыхательного коэффициента (отношение количества выделившегося  $\text{CO}_2$  к количеству поглощенного  $\text{O}_2$ ) также могут быть связаны с физическими процессами, а не с метаболической активностью почвенной биоты. Наряду с обратимой физико-химической сорбцией наблюдается необратимое сорбирование углекислоты (Хегай и др., 1980). Природа этого явления не выяснена. Предполагается, что оно связано с проникновением молекул  $\text{CO}_2$  внутрь твердых частиц или замкнутых пор.

Почва, являясь продуктом взаимодействия живых организмов с верхними слоями литосферы, постоянно обменивается газами, как с материнской породой, так и с подстилающими геологическими породами. В этом взаимообмене можно выделить два компонента, циклический и постоянный. Первый связан с сезонной активностью почвенной биоты, ослабевающей в холодный зимний период и возобновляющейся с началом весны. Условно постоянная составляющая газообмена с литосферой представляет собой потоки газообразных веществ, поступающих из недр Земли по микротрещинам и разломам, а также в процессе дегазации осадочных отложений. Без постоянного потока  $\text{CO}_2$  из глубинных слоев Земли в течение времени, сравнимого с продолжительностью геологических эпох невозможно поддержание относительно постоянной концентрации углекислого газа в атмосфере (Будыко, 1995). Скорость расхода углерода на образование карбонатных пород примерно в шесть раз выше скорости отложения органического углерода. В современную эпоху атмосферный пул углерода поддерживается за счет процессов дыхания и минерализации органического вещества в биосфере, дегазации геологических пород и

поступления из глубоких недр с продуктами вулканических извержений (Войтов, 1975; Алпатъев, 1983).

### *3.2 Биологические факторы почвенного «дыхания»*

В почве подземные органы растений, мелкие почвенные животные и микроорганизмы представляют биологический источник углекислого газа и являются потребителями кислорода. Экспериментально определить долю каждой функциональной группы биоценоза в общем потоке  $\text{CO}_2$  в атмосферу довольно трудно. Длительное время исследования почвенного дыхания проводились в агроценозах различных сельскохозяйственных культур. По данным разных авторов дыхание подземных органов растений в агроценозах составляет до 30-40 % от общего почвенного потока углекислого газа (Макаров, 1952; Южные черноземы ..., 1974; Monteith et al., 1965; Mogensen, 1977; Alvarez et al., 1996; Rochette, Flanagan, 1997; и другие).

Мелкие почвенные беспозвоночные животные благодаря большой численности также могут вносить существенный вклад в дыхание почвы. В почвах пятнистой тундры их вклад может составлять 4,5-19,0 мл  $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ , в лесных почвах 17-25 мл  $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$  (Бызова, 1986). Однако, такие работы проводятся редко и поэтому дать более детальную количественную характеристику вклада этой группы живых организмов в суммарное дыхание почвы не представляется возможным. Обычно их дыхательная активность включается в общее гетеротрофное дыхание почвы без корней.

Для почв под естественной растительностью доля дыхания корней в общей эмиссии углекислого газа имеет более широкий диапазон, от 17-20 до 90 % (Kucera, Kirkham, 1971; Coleman, 1973; Wildung et al., 1975; Tesařová, Gloser, 1976; Billings et al., 1977; Herman, 1977; Warembourg, Paul, 1977; Redman, 1978; Redman, Abouguendia, 1978; Chapman, 1979; Thierron, Laudelout, 1996; Kelting et al., 1998). Особенно высок вклад корней в дыхание почв влажных широколиственных лесов. В глобальном масштабе поступление  $\text{CO}_2$  в атмосферу за счет дыхания подземных органов растений оценивается величиной в 30 % от суммарной эмиссии (Кобак, 1988).

Вклад корней в суммарную эмиссию изучался нами в техногенных экосистемах Назаровской котловины. Для начальных стадий вторичной сукцессии на спланированном отвале соотношение дыхания корней растений и комплекса почвенных микроорганизмов и мелких беспозвоночных животных составляло примерно 1 : 2. На долю подземных органов растений в посеве многолетних трав на рекультивированном отвале с нанесенным черноземным слоем в общем потоке  $\text{CO}_2$  приходилось более 70 %.

### *3.3 Ферментативные процессы и почвенный газообмен*

С участием ферментов (энзимов) в почве осуществляется большое количество биохимических реакций. Особую роль выполняют иммобилизованные ферменты, образующие стабильную биохимическую

систему. Благодаря специфическим свойствам они во много раз ускоряют протекание реакций при обычной температуре и давлении. Велика их роль в почвообразовательных процессах.

Во многих ферментативных реакциях принимают участие в качестве исходных или конечных продуктов газообразные вещества. Роль этих процессов в почвенном газообмене изучена крайне мало. Возможный вклад ферментативных процессов в почвенное «дыхание» рассматривался на примере уреазы, осуществляющей в почве разложение мочевины с выделением углекислого газа и аммиака.

Исследованные черноземные почвы имели сравнительно низкий уровень обогащения уреазой. Ферментативная активность целинных почв снижалась сверху вниз в пределах 0-50 см слоя. Измененный в результате сельскохозяйственного использования выщелоченный чернозем ЧВ<sub>з</sub> и ЧВ<sub>оп</sub> характеризовался неравномерным распределением по глубине уреазной активности. Окультуренная почва также отличалась более высоким уровнем обогащения.

Полученные оценки выделения углекислого газа показывают, что за счет биохимических реакций в почвах черноземного ряда может быть достигнут высокий уровень продуцирования CO<sub>2</sub>, сравнимый с величинами эмиссионных потоков (таблица 1). Очевидно, мероприятия с внесением органических удобрений, особенно навоза, будут стимулировать как микробиологическую деятельность, так и биохимическую (ферментативную) активность. По-видимому, биологический и биохимический почвенный пул дополняют друг друга, обеспечивая высокую функциональную устойчивость экосистемы.

Таблица 1. Уреазная активность черноземных почв Приобья (t = 12-14 °C)  
мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/ч (мг CO<sub>2</sub> на 10 г абсолютно сухой почвы за 24 часа)

Слой, см	ЧО <sub>ц</sub>	ЧЛ <sub>ц</sub>	ЧВ <sub>з</sub>	ЧВ <sub>оп</sub>
0 – 10	268 (0,44)	255 (0,46)	321 (0,52)	357 (0,63)
10 – 20	133 (0,25)	263 (0,48)	98 (0,17)	391 (0,65)
20 – 30	195 (0,36)	214 (0,41)	186 (0,30)	256 (0,77)
30 – 40	172 (0,33)	173 (0,32)	137 (0,27)	307 (0,64)
40 – 50	146 (0,28)	73 (0,17)	158 (0,37)	328 (0,83)
Сумма	914	978	900	1639

Примечание. ЧО<sub>ц</sub> – чернозем обыкновенный (целина), ЧЛ<sub>ц</sub> – черноземно-луговая почва (целина), ЧВ<sub>з</sub> – чернозем выщелоченный (залежь), ЧВ<sub>оп</sub> – чернозем выщелоченный, орошаемый (пашня).

Изучение температурной зависимости ферментативной активности позволило получить некоторые термодинамические характеристики реакции гидролиза мочевины. Самым высоким температурным коэффициентом, энергией активации фермент-субстратного комплекса и тепловым эффектом

уреазной реакции отличался орошаемый выщелоченный чернозем в температурном диапазоне 22 – 32 °С. Термодинамические характеристики активированного комплекса уреазы несколько выше, чем у аналогичной почвы в условиях Южного Приуралья, что может быть связано с эффектом «холодных» почв, наблюдавшимся некоторыми авторами (Хазиев, 1982). Проведенный анализ показывает необходимость изучения биологического и биохимического факторов почвенного газообмена. Изменение параметров окружающей среды, вызванное хозяйственной деятельностью, может по-разному отразиться на каждом из них.

#### 4 ДЫХАНИЕ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

Почвенный CO<sub>2</sub>- газообмен является по своей сути интегральным проявлением происходящих в экосистеме изменений. В ходе самозарастания отвалов наблюдаются последовательные, сукцессионные смены биоценозов и изменяются многие обменные процессы. Исследования CO<sub>2</sub>-газообмена почвенного субстрата на разных стадиях развития техногенной экосистемы, ландшафта представляют большой научный и практический интерес в связи с необходимостью решения глобальной проблемы углеродного баланса и угрозы необратимых изменений окружающей среды. К сожалению, закономерности становления этой почвенной функции в техногенных условиях фактически не изучены.

##### *4.1 CO<sub>2</sub>-газообмен формирующихся почв техногенных экосистем*

На начальных этапах почвообразования решающее значение для становления функции почвенного газообмена имеет метаболическая активность первичного биоценоза. Процесс освоения биоценозом почвенного субстрата происходит довольно быстро. Это связано с разрастанием подземных органов растений и проникновением живых корней вглубь почвообразующей породы. Наблюдения за скоростью продуцирования CO<sub>2</sub> на вторично зарастающем спланированном отвале выявили высокую динамичность процесса как при смене фитоценозов в ходе сукцессии, так и в течение вегетационного сезона или даже одного месяца. К третьему году зарастания отвала интенсивность продуцирования CO<sub>2</sub> в верхнем слое почвенного субстрата достигла значений 400-450 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/ч, что находится в сравнимых пределах с величинами дыхания некоторых зрелых почв (Наумов, 1994). На шестой год сукцессии суммарная скорость выделения CO<sub>2</sub> в слое 0-36 см составляла 1110 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/ч в июле-августе, а в сентябре снизилась до 540 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/ч. Высокие скорости продуцирования углекислоты объясняются большим запасом живых корней растений, интенсивным разложением мертвых растительных остатков и возросшей скоростью оборота микробной биомассы (Сукцессии ..., 1993).

На рекультивированном участке с посевом многолетних трав сформировалось многовидовое растительное сообщество. В составе травостоя преобладали *Medicago sativa*, *Trifolium repens*, *Bromopsis inermis*,



*Elytrigia repens*. Несмотря на большое количество живых корней и мертвых растительных остатков, интенсивность дыхания почвы на скашиваемых участках 8 и 10 лет использования была значительно ниже, чем на вторично зарастающем отвале шестилетнего возраста. Скашивание зеленой массы мало сказывалось на величине почвенного дыхания.

Таблица 2. Дыхание почв, формирующихся на отвалах первичного зарастания (терриконах), в условиях сухого (1986 г.) и влажного (1987 г.) вегетационного сезона, слой 0-12 см

Объект	Температура измерения, °С	Дыхание, мг CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> /ч	Температура почвы, °С	Влажность почвы, %
21-22/07/86				
О.1 (Э)	21,6	371 ± 46	20,3	17,5 ± 0,6
О.1 (Т)	21,6	488 ± 23	19,0	14,4 ± 0,2
О.1 (А)	21,6	271 ± 54	17,0	17,5 ± 0,4
О.2 (Э)	21,6	375 ± 85	19,1	18,1 ± 0,8
О.2 (Т)	21,6 ± 0,1	271 ± 44	18,5	18,1 ± 0,8
О.2 (А)	21,6	379 ± 11	17,6	29,1 ± 6,3
О.3 (Э)	20,8 ± 0,1	258 ± 78	24,5	10,1 ± 2,0
О.3 (Т)	21,1 ± 0,1	392 ± 129	19,5	13,1 ± 1,0
О.3 (А)	21,2	379 ± 85	17,9	29,4 ± 2,8
13-14/07/87				
О.1 (Э)	22,6	142 ± 45	24,6	7,6 ± 0,2
О.1 (Т)	22,6	н.д.	21,4	10,4 ± 0,8
О.1 (А)	23,1 ± 0,7	233 ± 129	21,4	10,8 ± 0,6
О.2 (Э)	24,0	1046 ± 213	17,4	15,5 ± 1,4
О.2 (Т)	23,9 ± 0,1	821 ± 180	18,2	15,2 ± 1,7
О.2 (А)	23,5 ± 0,1	1425 ± 226	20,6	26,0 ± 2,5
О.3 (Э)	23,6	133 ± 31	24,0	17,7 ± 2,4
О.3 (Т)	23,5	133 ± 13	23,2	21,1 ± 0,8
О.3 (А)	23,5	58 ± 7	20,3	44,6 ± 3,6

Примечание. (Э), (Т) и (А) – элювиальная, транзитная и аккумулятивная позиции техногенной катены. Статистические оценки показателей даны как среднее ± ошибка среднего; н.д. – нет данных.

Внутренние отвалы Назаровского и Ачинского угольных разрезов разных сроков отсыпки (терриконы О.1, О.2, О.3) представляли собой модельный ряд первичной сукцессии в процессе зарастания. Результаты измерений скорости продуцирования углекислого газа почвенным субстратом на разных стадиях формирования техногенной экосистемы показаны в таблице 2. Исследования проводились в разных погодных условиях вегетационного сезона. Это позволило выявить некоторые

особенности CO<sub>2</sub>-газообмена формирующихся техногенных почв. К началу вегетационного сезона 1986 г. возраст отвалов О.1, О.2, О.3 составлял 1, 7 и 25 лет, соответственно. Они характеризовали с некоторой долей условности инициальную, переходную и зрелую стадии в развитии техногенной экосистемы.

Полученные результаты показали, что техногенные почвы или «эмбриоземы» характеризовались относительно высокой скоростью продуцирования CO<sub>2</sub> и значительной пространственно-временной вариабельностью изучаемого показателя. Понятие сухого и влажного сезона для анализа динамики почвенного дыхания оказалось мало пригодным. Скорость продуцирования CO<sub>2</sub> почвой определялась сочетанием температуры и влажности субстрата в каждый конкретный момент времени. Поэтому для интерпретации экспериментальных данных использовался метод функций отклика. В качестве такой функции была выбрана регрессионная зависимость почвенного дыхания от температуры и влажности почвы:  $R = a \cdot \exp(b \cdot t) \cdot w^c$ , где  $R$  – интенсивность дыхания почвенного субстрата;  $t$  и  $w$  – температура и влажность почвы, соответственно;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – параметры модели. Критерием выбора стандартных условий было равенство частных производных функции отклика по факторам среды. Оказалось, что это равенство выполняется для данной регрессионной модели при любом значении температуры и определенной (стандартной) влажности, которая определяется численными значениями параметров модели. Поэтому для сравнения объектов по скорости почвенного дыхания была принята температура почвы 20 °С и стандартная влажность,  $w_0$ . Высокие величины температурных коэффициентов продуцирования CO<sub>2</sub> свидетельствовали о большом вкладе почвенно-физических процессов, связанных, например, с десорбированием поглощенной углекислоты с поверхности твердой фазы.

#### *4.2 Дыхание почвы терминальных травяных экосистем*

Конечным результатом сукцессии - последовательной, направленной смены биоценозов является медленно меняющееся терминальное сообщество. Особенности почвенного CO<sub>2</sub>-газообмена наиболее вероятных терминальных экосистем рассматриваются на примере дыхания черноземно-луговой (Л.1, мезофитный луг, пастбище) и лугово-черноземной почвы (Л.2, постсенокосный остепненный луг). На пастбище динамика выделения CO<sub>2</sub> характеризовалась одним максимумом в середине июля. Средняя скорость эмиссии за летний период составила 29,6 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сутки. На заповедном участке Л.2 летняя динамика рассматриваемого показателя была совершенно противоположной: интенсивность дыхания, высокая в начале сезона, резко снизилась (~ в 5 раз) к середине июля, а к концу августа опять значительно возросла. Средняя скорость эмиссии была ниже, чем на пастбище (18 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сутки).

Таблица 3. Параметры функции отклика дыхания почвы под сеянными травами на рекультивированном отвале (С.1 и С.2, сенокос) и черноземно-луговой почвы под естественной луговой растительностью (Л.1, пастбище) при антропогенной нагрузке (слой 0-12 см)

Показатель	Экосистема (возраст, лет)		
	С.1 (10)	С.2 (12)	Л.1
$a \pm m_a$	$1,1 \cdot 10^{-3} \pm 9,7 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 7,7 \cdot 10^{-3}$	$0,166 \pm 5,5 \cdot 10^{-3}$
$b \pm m_b$	$0,156 \pm 3,6 \cdot 10^{-3}$	$0,056 \pm 7,4 \cdot 10^{-3}$	$0,028 \pm 1,6 \cdot 10^{-3}$
$c \pm m_c$	1,98±1,02	1,28±0,84	1,02±0,89
$R_{ст}$ , г CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> /сутки	3,7	13,3	11,3
$w_0$ , %	12,7	22,8	36,4
$Q_{10}$	4,8	1,7	1,3
$m$	1,3	1,2	1,5
$N$	7	7	12
$\alpha$	0,05	0,05	0,05

Примечание.  $m$  – ошибка регрессии;  $m_a$ ,  $m_b$ ,  $m_c$  – ошибки параметров,  $N$  – количество экспериментальных точек,  $\alpha$  – уровень существенности.

Синхронность в дыхании отдельных слоев, установленная для черноземно-луговой почвы, не соблюдалась в техногенной экосистеме с нанесенным черноземным слоем, который функционировал относительно автономно. Несмотря на некоторые различия в сезонной динамике почвенного CO<sub>2</sub>-газообмена на пастбище и на рекультивированном отвале расчет параметров зависимости  $R(t, w)$  выявил большое сходство между этими объектами (таблица 3). Нанесение черноземного слоя на поверхность спланированного отвала вскрышной породы, по-видимому, является жестким условием, определяющим направленность сукцессии по луговому типу, которое снижает частоту флуктуаций, характерных для инициальной стадии развития. Показатели регрессионной модели рассчитывались по средним значениям дыхания, полученным за три последних года сукцессии. Изменения  $R_{ст}$ ,  $w_0$  и  $Q_{10}$  на рекультивированном участке происходили с возрастом экосистемы так же, как и при самозаращении без подсыпки чернозема, то есть первые два параметра увеличили свои значения, а температурный коэффициент уменьшился. Их численные значения оказались ближе к показателям терминальной экосистемы, чем при вторичном заращении. Однако, несмотря на близкие значения некоторых показателей почвенного дыхания техногенной и естественной травяной экосистемы, выявляются глубокие структурно-функциональные различия присущих им биоценозов. В перспективе для их сближения может потребоваться длительный период времени.

## 5 CO<sub>2</sub>- ГАЗООБМЕН КАРБОНАТНЫХ ПОЧВ

Почвы карбонатного ряда содержат значительное количество органического и неорганического углерода. Значительное накопление неорганического углерода в осадочных породах свидетельствует о важной планетарной роли процесса карбонатообразования в почвах и природных водах. Около  $(0,7-1) \cdot 10^{15}$  кг С содержится в карбонатах аридных почв мира (Schlesinger, 1985; Lal, Kimble, 2000). Изучение функционирования почвенной карбонатной системы в разных экологических условиях, при разных антропогенных нагрузках, а также в связи с прогнозируемыми глобальными климатическими изменениями является важной современной проблемой.

### *5.1 Физико-химические характеристики черноземных почв Приобья*

Черноземные почвы составляют наиболее ценную в сельскохозяйственном отношении часть земельного фонда. В связи с интенсивным использованием этих почв представляют научный и практический интерес исследования динамики компонентов и процессов, определяющих функционирование почвенной карбонатной системы, оценка их экологической функции в биосфере. Необходимой задачей на современном этапе является корректировка знаний о формировании карбонатного профиля черноземных почв и роли карбонатной системы в газообмене с атмосферой.

Изученные почвы распространены в пределах Приобского плато, которое имеет абсолютные высоты от 150 до 230 м. Почвообразующие породы представлены средними и тяжелыми карбонатными суглинками. Выщелоченные и обыкновенные черноземы в комплексе с лугово-черноземными почвами занимают водораздельные пространства и склоны к ложбинам древнего стока. Пресные грунтовые воды залегают здесь глубже 10 метров и активного участия в процессах почвообразования не принимают. В пониженных элементах рельефа, широких депрессиях между увалами и по днищам логов распространены луговые почвы (Почвы ..., 1966).

По содержанию органического углерода изученные почвы относятся к средне- и малогумусным со сравнительно небольшой мощностью гумусового горизонта. Почвы имеют сравнительно хорошие водно-физические свойства. Общая порозность составляет 51-64 % в верхнем гумусовом горизонте и снижается до 42-48 % в переходном. Рассматриваются водный и температурный режимы, особенности распределения карбонатов, кислотно-основные свойства.

### *5.2 Газовая фаза*

Кислород составляет значительную по объему часть почвенного воздуха, что связано с преимущественным его поступлением из атмосферы. Наблюдался слабо выраженный градиент снижения концентрации вниз по профилю. Среди исследованных почв выщелоченные черноземы выделялись

несколько пониженным содержанием кислорода в почвенном воздухе, что связано с условиями их увлажнения и более интенсивным биологическим окислением органического вещества. Однако и в этом случае концентрация  $O_2$  не опускалась ниже 19,6 %. Несмотря на высокую насыщенность верхних горизонтов корнями растений и микроорганизмами в черноземных почвах Приобья не наблюдается эффект «биологического экрана» в обеспечении глубоких слоев почвенного профиля свободным кислородом, что подтверждает представление о наиболее благоприятных условиях воздушного режима черноземов по сравнению с другими типами почв (Николаева, 1970).

Режим углекислоты почвенного воздуха более динамичен, чем кислорода, что связано с несколькими источниками ее поступления в газовую фазу и высокой растворимостью в водной среде. В черноземе обыкновенном концентрация углекислого газа в почвенном воздухе в начале вегетационного сезона была сравнительно низкой. С повышением температуры и прогреванием почвы она быстро возросла и уже в середине июня достигла максимальных значений. Далее на фоне общего снижения концентрации происходило перераспределение углекислоты по профилю. Примерно такая же сезонная динамика прослеживалась в черноземно-луговой почве, но при более высоком уровне концентрации. В черноземе выщелоченном (залежь) увеличение концентрации  $CO_2$  в первой половине летнего периода шло постепенно. Максимальные значения были достигнуты лишь в начале июля. В целом сезонная динамика характеризовалась двумя максимумами, летним и осенним. Орошаемый выщелоченный чернозем кукурузного поля отличался самыми высокими концентрациями углекислого газа в почвенном воздухе. Уже на глубине 20-40 см содержание  $CO_2$  достигало 1-2 %. В связи с особенностями гидротермического режима сезонная динамика этого показателя имела более сложный характер с несколькими подъемами и спадами.

Для углубленного анализа данные по распределению углекислого газа в почвах удобно представлять в виде хроноизоплант (рисунок 2). Массивы исходных значений концентраций обрабатывались с помощью процедуры сплайн-сглаживания. На графиках ясно просматривается формирование зон с повышенным содержанием углекислого газа в почвенно-грунтовой толще. В радиальном направлении от областей с максимальным уровнем  $CO_2$  концентрация газа постепенно уменьшается. Таким образом, факт диффундирования углекислоты в вертикальном направлении к поверхности и

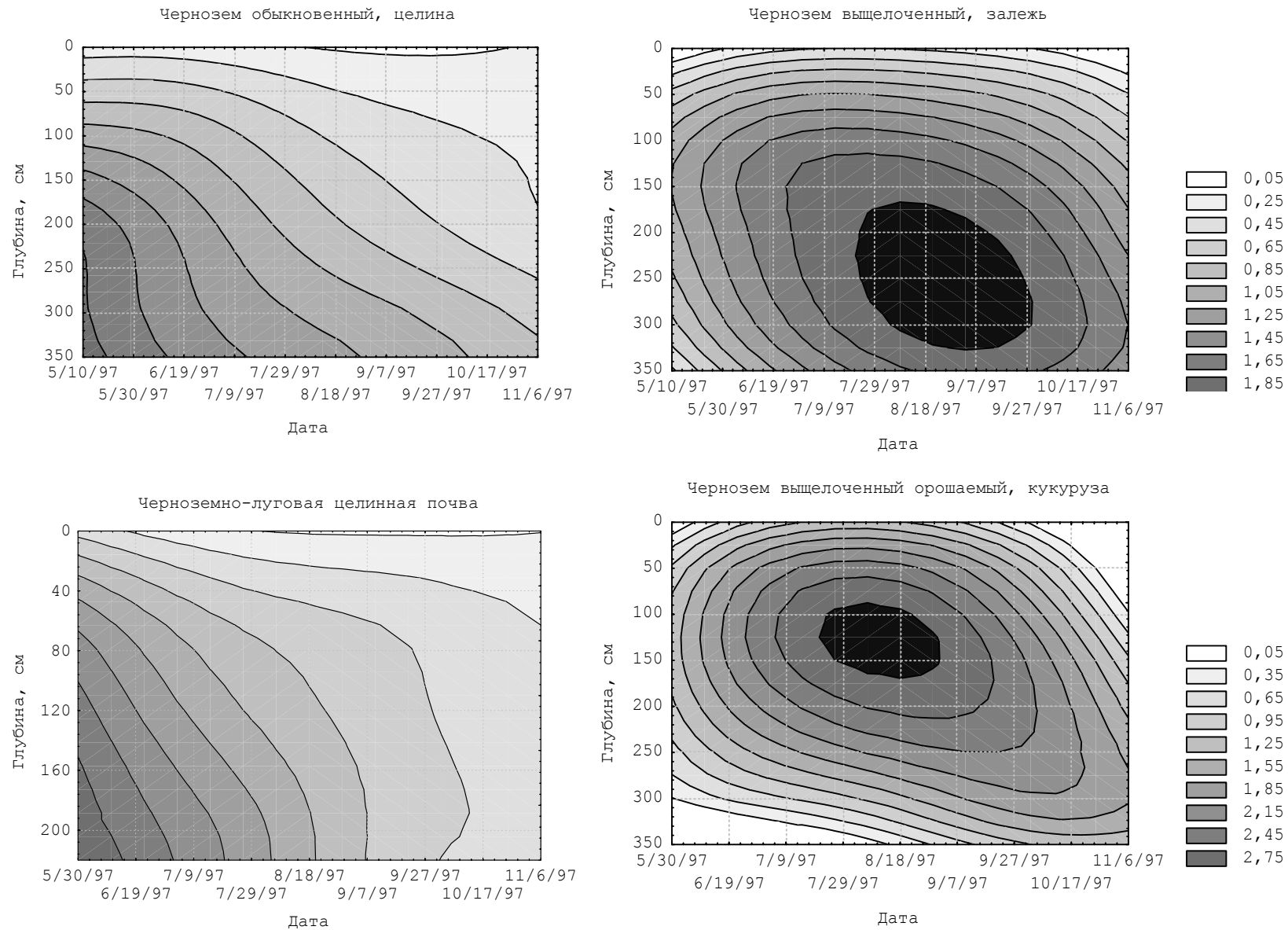


Рисунок 2. Хроноизоплеты содержания углекислоты (об. %) в почвенном воздухе черноземных почв в 1997 г., полученные с помощью процедуры сглаживания

вглубь почвообразующей породы не вызывает сомнения. Для разных почвенных объектов (условий) характерное время образования пространственно-временной структуры и расстояние от ее условного центра до верхней границы профиля (поверхности почвы) существенно отличаются. Окультуривание вызывает подтягивание зоны максимальных концентраций к поверхности почвы. Очевидно, учитывая большой вклад биологической и биохимической составляющих в продуцирование  $\text{CO}_2$ , установленные закономерности можно рассматривать как явление самоорганизации в почвенной среде, связанное с необходимостью диссипации энергии.

### 5.3 Углекислота в почвенном растворе

Сезонная динамика концентрации  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе черноземных почв определяется изменчивостью парциального давления газа в почвенном воздухе. Максимальные расчетные концентрации растворенного углекислого газа (все формы) 1,6-1,8 мМ/л получены для чернозема выщелоченного  $\text{ЧВ}_{\text{оп}}$  (слой 100-300 см). Самым низким содержанием  $\text{CO}_2$  в почвенном растворе характеризовался чернозем обыкновенный  $\text{ЧО}_{\text{ц}}$ . Максимальный уровень содержания  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе этой почвы не превышал 0,9 мМ/л. Полученные данные позволили рассчитать запасы углекислоты в жидкой и газовой фазе (таблица 4). В целом изменение запасов в течение вегетационного сезона соответствовало уровню парциального давления  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе. Основной вклад вносили более глубокие слои, 100-200 и 200-300 см. В черноземе выщелоченном несколько возрастает роль верхнего метрового слоя. Самые высокие запасы характерны для чернозема выщелоченного.

Таблица 4. Средний запас  $\text{CO}_2$  в черноземных почвах Приобья, г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$

Почва (слой, см)	Фаза		
	жидкая	газовая	сумма
$\text{ЧО}_{\text{ц}}$ (300)	5,5	11,7	17,2
$\text{ЧЛ}_{\text{ц}}$ (200)	6,0	12,7	18,7
$\text{ЧВ}_3$ (300)	15,2	32,1	47,3
$\text{ЧВ}_{\text{оп}}$ (300)	21,3	37,9	59,2

Примечание. Обозначения как в таблице 1.

### 5.4 $\text{CO}_2$ и $\text{O}_2$ газообмен черноземных почв

Использование в работе диффузионного метода, основанного на измерении градиента концентрации газов в верхнем слое почвы позволило оценить скорость газообмена черноземных почв с атмосферой (рисунок 3) и сравнить ее с внутрипочвенным продуцированием  $\text{CO}_2$ .

В сезонной динамике газообмена  $\text{ЧВ}_{\text{оп}}$  наблюдалась синхронность потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ . В других почвах ( $\text{ЧО}_{\text{ц}}$ ,  $\text{ЧЛ}_{\text{ц}}$  и  $\text{ЧВ}_3$ ) эмиссия углекислого газа из верхнего слоя в атмосферу отставала от входного потока кислорода. Причиной запаздывания является двухкомпонентная природа «дыхания»

почвы, проявляющаяся в процессах поглощения кислорода и выделения углекислоты, разделенных между собой реакциями окисления органического вещества. Длительность периода запаздывания может служить мерой устойчивости гумуса к разложению в естественных условиях.

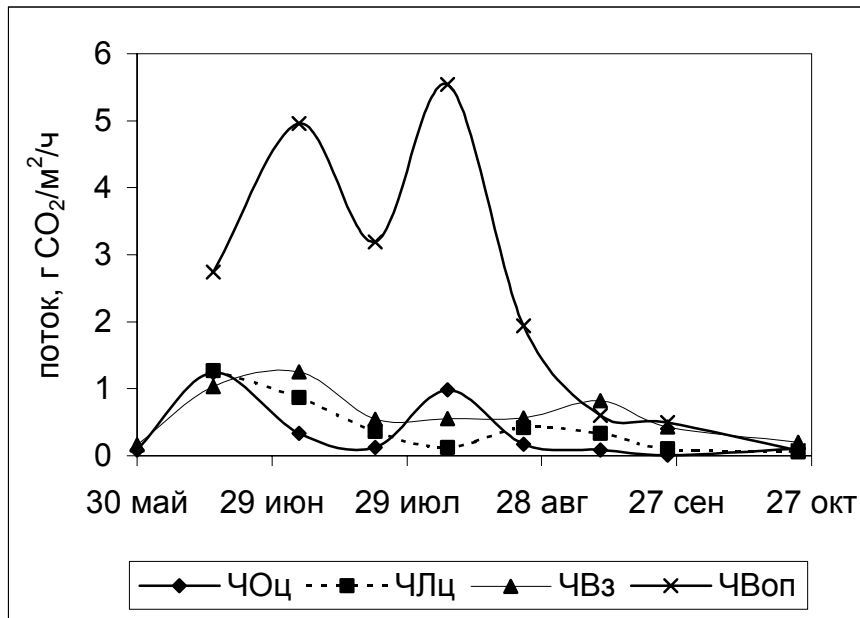


Рисунок 3. Сезонная динамика выделения углекислого газа в атмосферу с поверхности черноземных почв (диффузионный метод, 1997 г.)

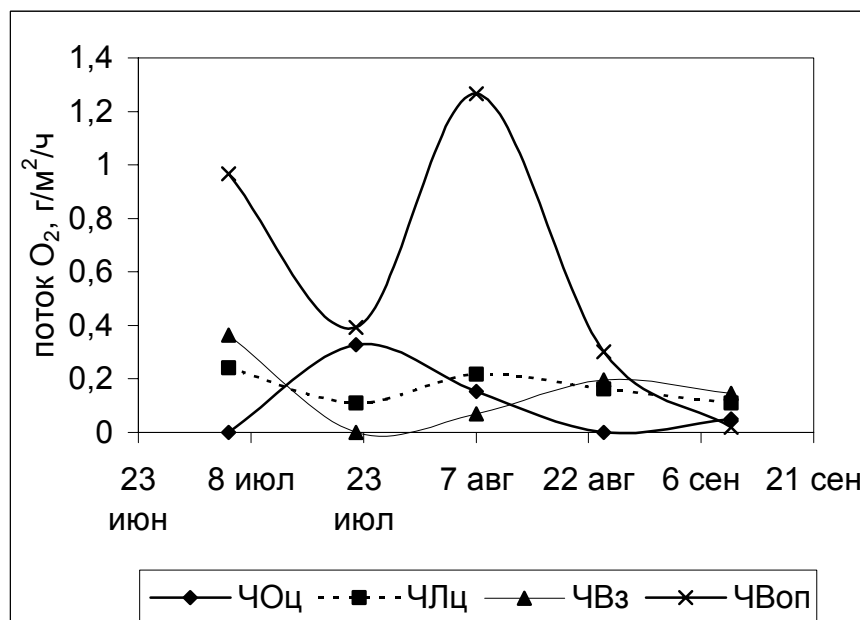


Рисунок 4. Динамика поглощения кислорода из атмосферы черноземными почвами различного использования (диффузионный метод, 1997 г.)

Количество выделенного CO<sub>2</sub> и поглощенного O<sub>2</sub> за теплый период года (120 дней) рассматривается в качестве обобщенной характеристики



почвенного газообмена (таблица 5). Во всех случаях эмиссия углекислого газа значительно превышала поступление кислорода в почву. При интенсивной технологии выращивания сельскохозяйственных культур на выщелоченном черноземе с применением орошения потери углерода в виде  $\text{CO}_2$  значительно возрастают, примерно в 4 раза по сравнению с залежью. Высокие дыхательные коэффициенты указывают на большой вклад небиологических составляющих в общей эмиссии (десорбция  $\text{CO}_2$  с поверхности твердой фазы и разложение карбонатов).

Таблица 5. Обобщенные характеристики  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  газообмена черноземных почв за теплый период 1997 года

Почва	Поглощено $\text{O}_2$ , г $\text{O}_2/\text{м}^2/\text{период}$	Выделено $\text{CO}_2$ , г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{период}$	Дыхательный коэффициент, ДК
ЧО <sub>ц</sub>	308	1008	2,4
ЧЛ <sub>ц</sub>	484	1273	1,9
ЧВ <sub>з</sub>	446	1777	2,9
ЧВ <sub>оп</sub>	1696	7036	3,0

### 5.5 Динамика карбонатной системы черноземных почв

Для оценки динамики состояния карбонатно-кальциевой системы (ККС) черноземных почв были использованы данные по внутрипрофильному распределению углекислого газа в почвенном воздухе. Расчеты строились на основании теоретических представлений о химических равновесных реакциях ККС (Гаррелс, Крайст, 1968; Алекин, 1970)

Сравнительный анализ оценок величин рН, полученных расчетным методом и измеренных в водных суспензиях, позволил выявить существенные ограничения в использовании экспериментальных значений этого показателя для диагностики почв и описания почвенного профиля. Показано значительное различие, как в абсолютных значениях показателя, так и в характере его профильного распределения и внутрисезонных изменений. Причина расхождения представленных оценок заключается, на наш взгляд, в нарушении естественных условий при извлечении образцов из почвы и необратимых изменениях их химического состава во время подготовки к анализу, сопровождающейся обычно процедурой высушивания и повторного увлажнения при приготовлении суспензии. Более надежную информацию о состоянии ККС дают прямые измерения  $\text{P}_{\text{CO}_2}$  и рН в полевых условиях (Зеличенко, Соколенко, 1984).

Характерное распределение основных составляющих ККС в профиле черноземных почв показано в таблице 6. Следует обратить внимание на щелочную реакцию верхнего слоя почвы, контактирующего с атмосферой.

Таблица 6. Распределение основных компонентов ККС в профиле черноземных почв 22-23/07/97

Глубина, см	pPco <sub>2</sub>	pH	pCa <sup>••</sup>	pHCO <sub>3</sub> '	pCO <sub>3</sub> "
Чернозем обыкновенный целинный, ЧО <sub>ц</sub>					
0	3,31	8,23	3,18	2,88	4,93
20	2,89	7,97	2,99	2,69	5,08
40	2,63	7,80	2,89	2,59	5,17
60	2,46	7,69	2,83	2,53	5,23
80	2,23	7,54	2,75	2,45	5,31
100	2,50	7,72	2,81	2,51	5,22
200	2,03	7,42	2,62	2,32	5,38
300	2,02	7,42	2,60	2,30	5,39
Черноземно-луговая целинная почва, ЧЛ <sub>ц</sub>					
0	3,40	8,28	3,20	2,91	4,91
20	2,54	7,74	2,85	2,55	5,20
40	2,31	7,59	2,76	2,46	5,28
60	2,07	7,43	2,67	2,37	5,36
80	1,91	7,33	2,62	2,32	5,42
100	2,06	7,43	2,67	2,37	5,37
200	1,68	7,18	2,53	2,23	5,50
Чернозем выщелоченный (залежь), ЧВ <sub>з</sub>					
0	3,40	8,29	3,18	2,89	4,91
20	2,36	7,63	2,77	2,48	5,27
40	2,10	7,46	2,68	2,38	5,35
60	1,97	7,37	2,63	2,33	5,40
80	1,90	7,33	2,60	2,30	5,42
100	1,82	7,28	2,56	2,26	5,45
200	1,76	7,25	2,53	2,23	5,47
300	1,78	7,26	2,53	2,23	5,47
Чернозем выщелоченный орошаемый (кукуруза), ЧВ <sub>оп</sub>					
0	3,37	8,28	3,15	2,86	4,92
20	1,76	7,22	2,59	2,29	5,46
40	1,67	7,16	2,55	2,25	5,49
60	1,59	7,11	2,52	2,22	5,52
80	1,54	7,09	2,50	2,19	5,54
100	1,55	7,10	2,47	2,17	5,54
200	1,71	7,21	2,52	2,22	5,49
300	2,60	7,80	2,81	2,51	5,19

Величина pH снижается вниз по профилю, но остается в области слабощелочных значений. Концентрация ионов Ca<sup>••</sup> и HCO<sub>3</sub>' с глубиной

возрастает, а  $\text{CO}_3^{2-}$  падает. Некоторые отличия от общей тенденции наблюдаются в профиле чернозема выщелоченного на пашне (рисунок 5).

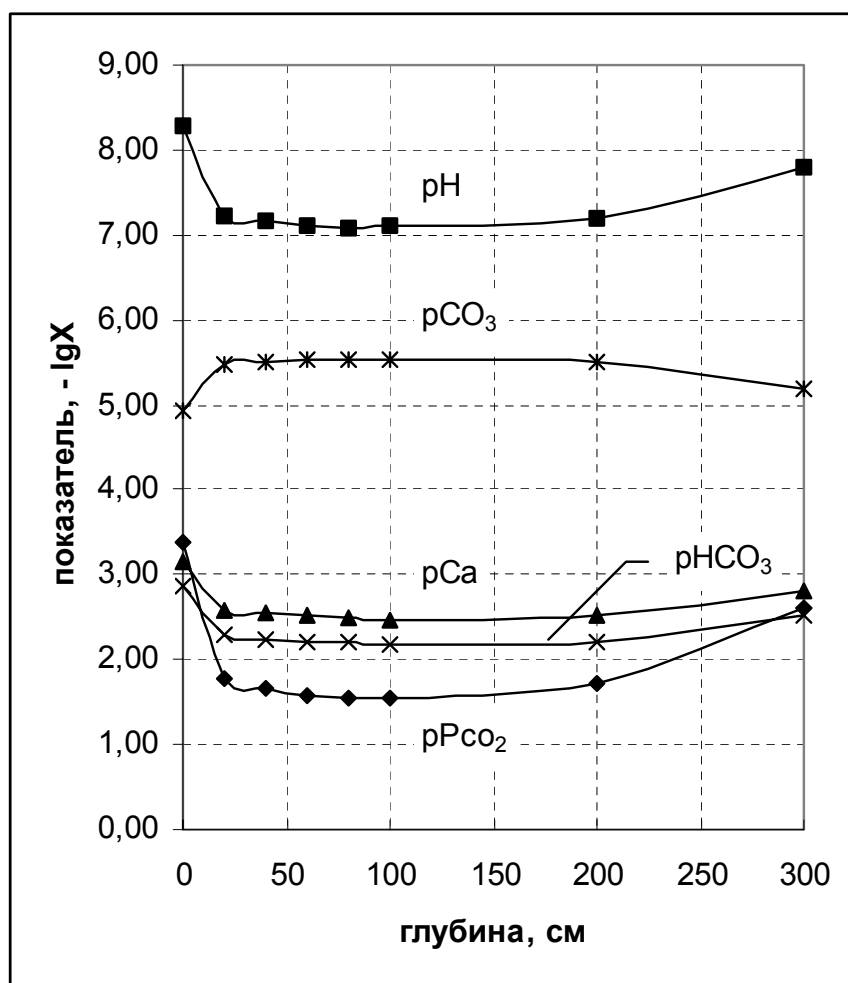


Рисунок 5 Распределение основных составляющих ККС в профиле чернозема выщелоченного ЧВ<sub>оп</sub> (23/07/97)

В условиях свободного газообмена с атмосферой концентрационные уровни компонентов ККС зависят от величины парциального давления  $\text{CO}_2$  и растворимости  $\text{CaCO}_3$ . В соответствии с распределением углекислого газа в профиле ЧВ<sub>оп</sub> происходило изменение рН: после характерного резкого спада в верхнем слое (10-20 см) следует плавное снижение до значений 7,0-7,1 в карбонатном горизонте  $\text{V}_{\text{Ca}}$ . Ниже 200 см уже наблюдается снижение парциального давления углекислого газа, сопровождающееся увеличением щелочности. Аналогичным образом ведут себя  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Карбонат-ион содержится в небольшом количестве, и его распределение в профиле имеет противоположную тенденцию. Таким образом, лишь в верхнем сравнительно тонком слое при щелочных значениях рН периодически возникают условия для равновесия твердого кальцита с почвенным раствором. Фактически, в толще почвы уже с глубины 20 см и до 200 см жидкая фаза агрессивна, то

есть, способна растворять  $\text{CaCO}_3$  (Гаррелс, Крайст, 1968; Иксанов, 1987). Ниже 300 см, где парциальное давление углекислого газа уменьшается, опять становится возможным состояние равновесия раствора с твердой фазой. Понижение  $P_{\text{CO}_2}$  будет способствовать выделению карбоната в осадок. Очевидно, что представленный механизм функционирования ККС можно перенести и на другие исследованные нами почвы. При этом следует учитывать особенности водного режима и распределение подземной биомассы в почвенном профиле.

Таким образом, в свете изложенных данных роль  $\text{CO}_2$ -газообмена в формировании карбонатного профиля черноземных почв представляется определяющей. Значение миграционных процессов, на которые указывают некоторые авторы (Афанасьева, 1966, 1974; Каретин, 1982; и другие), по-видимому, сильно преувеличено. Основная форма содержащихся в поровом растворе солей угольной кислоты – бикарбонаты. Доля нормальных карбонатов чрезвычайно мала. Подвижность границы вскипания от  $\text{HCl}$  не может рассматриваться как доказательство миграции солей, так как процессы растворения (выщелачивание) твердой фазы и осаждение различных форм  $\text{CaCO}_3$  осуществляются в определенном объеме почвы и, в зависимости от конкретных условий, могут проявляться по-разному. В черноземных почвах, сформировавшихся на карбонатных породах, преобладает процесс растворения  $\text{CaCO}_3$ . Условия  $\text{CO}_2$ -газообмена, складывающиеся в почвенном профиле, являются достаточными для развития этого процесса в большом объеме и на значительную глубину.

#### *5.6 О педогенном и литогенном образовании карбонатов*

В этом разделе обсуждаются вопросы происхождения лессовидных карбонатных пород, педогенного и литогенного образования карбонатов. Особо отмечено, что почвообразование по черноземному типу ведет в основном к «раскарбоначиванию» геологических пород, а не к накоплению карбонатов, как считают некоторые авторы. Образование гипсового горизонта в почвах субаридных территорий выполняет функцию «компенсаторного» механизма, выводящего избыток кальция из системы на длительный срок. Рассматривается последовательность отложения органического вещества, карбонатов и гипса на разных иерархических уровнях и в разном масштабе времени.

## 6 ГАЗООБМЕН В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

### *6.1 Дыхательный газообмен болотных растений*

Растительность вносит существенный вклад в общую эмиссию углекислого газа в атмосферу. В связи с малой изученностью исследования дыхательного газообмена болотных растений представляют определенный интерес. По интенсивности дыхания между травянистыми растениями и кустарничками не было выявлено существенных различий. Наоборот,

сфагновые мхи отличались сравнительно низкой скоростью  $\text{CO}_2$ -газообмена. При обычных в течение летнего периода температурах она составляла 0,1-0,4 мг  $\text{CO}_2$ /(г·ч). Виды сфагнума, произрастающие в условиях северных болот, отличались более низкой интенсивностью дыхания по сравнению с южными. Выявлена разная реакция сфагновых мхов на изменение условий окружающей среды. Отмечено замедление минерализации торфа под сфагновым ковром по сравнению с куртинами осоки и лишайника. Вклад мохового покрова в среднем за летний период составлял более 50 % от общего потока  $\text{CO}_2$ .

## 6.2 Экологические факторы и эмиссия газов

### 6.2.1 Температура и влажность

Гидротермический режим торфяных болотных почв оказывает непосредственное влияние на величину и динамику потоков парниковых газов в атмосферу. Поиск функциональной зависимости почвенного дыхания от факторов среды осуществляли в условиях пассивного эксперимента в лабораторных (на монолитах) и полевых условиях. В качестве рабочей регрессионной модели рассматривали аналогичную зависимость, как для минеральных почв (глава 4). В течение большей части летнего периода ведущим экологическим фактором по отношению к скорости эмиссии углекислого газа была температура ( $Q_{10}=2,4-2,6$ ). Показана возможность реконструкции динамики выделения  $\text{CO}_2$  по гидротермическим характеристикам болотной почвы.

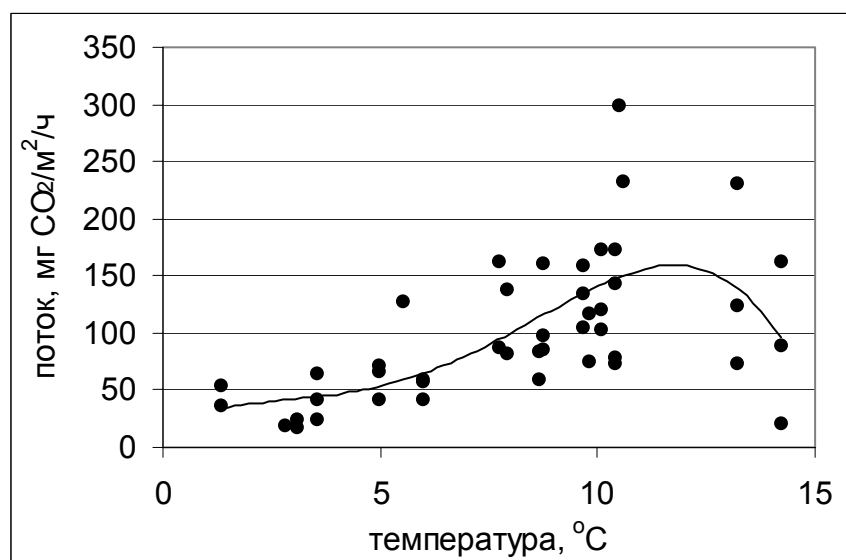


Рисунок 6. Обобщенная зависимость потока углекислого газа от температуры деятельного слоя для болот северной тайги

В результате обследования разных типов болот северной тайги построена обобщенная зависимость эмиссии углекислого газа от температуры деятельного слоя (рисунок 6). Наличие максимума на

обобщенной кривой в области 12-13 °С позволяет сделать предположение о сравнительно узком температурном диапазоне активности биоты северных болот в условиях многолетней мерзлоты. Характер полученной зависимости также подтверждает ведущую роль температурного фактора.

Выделение метана в болотных экосистемах северной тайги происходит неравномерно как в пространстве, так и во времени. Для потока  $\text{CH}_4$  ни в одном случае статистически достоверной связи с температурой установлено не было. Это объясняется сложным механизмом образования и транспорта метана в болотных экосистемах и активностью метанотрофного бактериального комплекса, локализованного в хорошо аэрируемой верхней части профиля.

#### *6.2.2 Условия освещения и концентрация газов*

Освещенность и концентрация углекислого газа являются основными экологическими факторами, определяющими продуктивность фотосинтеза зеленых растений. Через продукционное звено они оказывают влияние на весь цикл биологического круговорота углерода в болотной экосистеме. Газовый состав приземного слоя воздуха также определяет условия диффузии парниковых газов из почвы в атмосферу.

В полевых экспериментах выявлена линейная зависимость нетто-ассимиляции от концентрации  $\text{CO}_2$  в окружающей среде (рисунок 7). Взаимосвязь скорости эмиссии с уровнем содержания углекислого газа внутри экспозиционной камеры использовалась для оценки эффективности камерного метода. Разброс экспериментальных точек относительно линии регрессии характеризует пространственно-временное разнообразие условий измерения.

Полученные факты свидетельствуют об углекислотном лимитировании фотосинтеза болотной растительности. Заслуживает внимания высокий уровень концентрации  $\text{CO}_2$  в компенсационной точке, когда скорость газообмена становится равной нулю. Очевидно, что атмосферного  $\text{CO}_2$  недостаточно для обеспечения высокой первичной продуктивности, о которой сообщается в литературе (Пьявченко, 1967; Глебов, Толейко, 1975; Елина, Кузнецов, 1977; Козловская и др., 1978; Базилевич, 1993; Титлянова, 2001; и другие), и болотный фитоценоз использует другие источники поступления углерода.

#### *6.3 Парниковые газы в атмосфере и почвах болотных экосистем*

По уровню концентраций  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в приземном слое воздуха (у поверхности сфагнума) ключевые участки в разных подзонах существенно различались. Средние за летне-осенний период значения содержания газов в ряду северная, средняя и южная тайга составляли (ppmV, частей/миллион)  $463,30 \pm 4,06$  ( $n=212$ );  $416,73 \pm 3,95$  ( $n=150$ );  $555,43 \pm 9,69$  ( $n=130$ ) для  $\text{CO}_2$  и  $0,95 \pm 0,21$  ( $n=206$ );  $2,27 \pm 0,16$  ( $n=149$ );  $1,01 \pm 0,08$  ( $n=130$ ) для  $\text{CH}_4$ , соответственно.

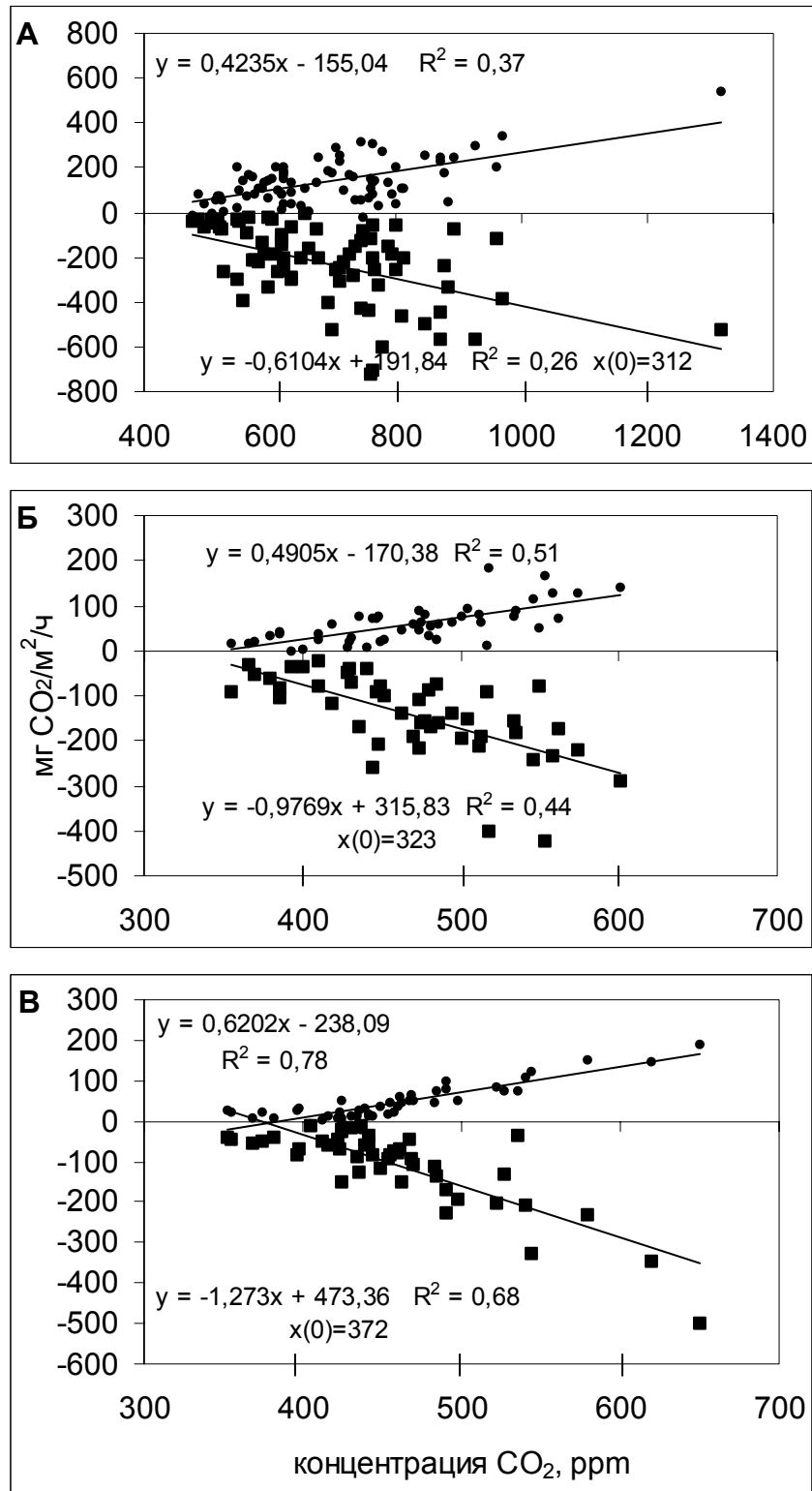


Рисунок 7. Взаимосвязь CO<sub>2</sub>-газообмена в темноте (+) и на свету (-) с уровнем содержания углекислоты в экспозиционной камере: А - мезо-олиготрофное осоково-сфагновое болото (южная тайга); Б - олиготрофное сосново-кустарничково-сфагновое болото (средняя тайга); В - олиготрофное осоково-сфагновое болото, мочажина (средняя тайга)

Содержание метана в атмосфере северных болот отличалось нерегулярным импульсным характером, что связано с процессами протаивания многолетней мерзлоты. Относительно высокий уровень  $\text{CH}_4$  наблюдался в летний период в приземном слое воздуха над болотами средней тайги. При низкой интенсивности естественных источников этот уровень, по-видимому, определялся существенным вкладом ископаемого метана, поступающего в атмосферу в результате эксплуатации нефтегазовых месторождений.

Изучено распределение по глубине растворенных  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в болотной воде. Выявлен ступенчатый характер кривых содержания метана, отражающий специфику транспортных механизмов этого газа. В направлении широтно-зонального градиента с севера на юг увеличивается содержание в болотной воде растворенного углекислого газа и метана. Эта закономерность соответствует изменению активности биологических процессов при переходе от холодных к более теплым местообитаниям.

#### *6.4 Потоки газов и транспортные механизмы*

На основании прямых анализов состава газовой фазы, содержания растворенных  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , а также данных измерений эмиссионных потоков рассмотрен вклад пузырькового и диффузионного механизмов транспорта газов в торфяной толще. Основной поток углекислого газа в атмосферу образуется за счет темнового дыхания надземных частей растений. Некоторое количество  $\text{CO}_2$  (от 1 до 20 % в разные периоды сезона) поступает путем диффузии из торфяной толщи. Пузырьковый транспорт  $\text{CO}_2$  вносит незначительный вклад в общий поток по сравнению с диффузией и дыханием надземной фитомассы. В эмиссионном потоке метана вклад пузырькового компонента является преобладающим.

#### *6.5 Болота как источник (сток) углекислого газа и метана на территории Западной Сибири*

Инвентаризация источников и стоков, оценка их мощности и динамики, исследование механизмов их функционирования необходимы для понимания сути происходящих природных изменений. Балансовые расчеты строились на основании средних за сезон оценок потоков углекислого газа и метана в разных болотных экосистемах. Показатели для подзоны рассчитывали методом взвешенной средней с учетом площадей, занимаемых болотными экосистемами на ключевых участках (таблица 7). Выявлена общая тенденция увеличения эмиссии углекислого газа и метана, а также нетто-ассимиляции углерода, в направлении с севера на юг. В пределах одной подзоны болотные экосистемы с более богатыми условиями минерального питания обычно имели и более высокие средние значения потоков углерода. Обращает на себя внимание низкая эмиссия метана с



Таблица 7. Оценки группированных средних значений потоков углерода на ключевых участках, мг С/м<sup>2</sup>/ч

Ключевые участки Экосистема (площадь, %)	Дыхание, R			Нетто-ассимиляция, P <sub>n</sub>			Эмиссия метана, Emt		
	среднее Ā	выборка N	ст.откл. σ	среднее Ā	выборка N	ст.откл. σ	среднее Ā	выборка N	ст.откл. σ
<b>«Северная тайга»</b> <sup>1)</sup>	<b>22,2</b>	<b>196</b>	<b>6,7</b>	<b>25,1</b> <sup>2)</sup>	—	—	<b>0,47</b>	<b>209</b>	<b>0,21</b>
ОСТ (3,3)	41,1	60	1,0	не опр.	—	—	0,80	60	0,12
СКС (30,0)	30,8	19	13,6	не опр.	—	—	0,00	18	0,01
ОС (24,6)	15,4	27	3,1	не опр.	—	—	1,05	26	0,56
ПБМ (15,9)	12,6	90	0,3	не опр.	—	—	0,39	105	0,09
<b>«Средняя тайга»</b>	<b>10,4</b>	<b>152</b>	<b>1,4</b>	<b>22,2</b>	<b>150</b>	<b>11,7</b>	<b>0,32</b>	<b>130</b>	<b>0,08</b>
КОСТ (2,1)	16,5	12	2,5	19,4	12	33,1	0,24	12	0,19
СКС (35,0)	12,6	62	1,7	29,1	60	12,0	-0,01	52	0,03
ОС (40,5)	6,7	72	0,9	13,5	72	9,7	0,60	60	0,12
ОСТ (2,2)	36,3	6	4,9	77,0	12	25,0	0,30	6	0,12
<b>«Южная тайга»</b>	<b>34,7</b>	—	—	<b>44,5</b>	—	—	<b>0,81</b>	—	—
СКС (33,4)	33,2 <sup>3)</sup>	—	—	не опр.	—	—	0,35 <sup>4)</sup>	—	—
ОСТ (51,5)	35,8	63	2,2	46,4	69	22,0	1,10	63	0,10
КОСТ (7,3)	33,8	42	2,5	37,9	46	15,2	0,88	42	0,09

Примечание.

1) оценки потоков для ключевых участков рассчитаны методом взвешенной средней с учетом площадей, занимаемых болотными экосистемами;

2) рассчитана по уравнению баланса  $P_n = G * (P_g/G)_{cp} - R$ , где G – запас зеленой фитомассы,  $(P_g/G)_{cp}$  – средняя интенсивность gross-фотосинтеза (на 1 г зеленой фитомассы) по наблюдениям на болотах средней и южной тайги; запасы фитомассы по (Косых, 2001; Васильев и др., 2002; Vasiliev et al. 2001a);

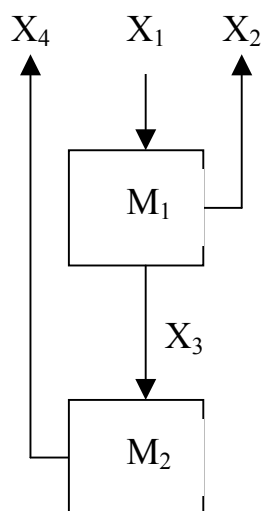
3) по (Glagolev et al., 2001); 4) по (Maksyutov et al., 1999; Glagolev et al., 2001);

5) не опр. – потоки не измеряли.

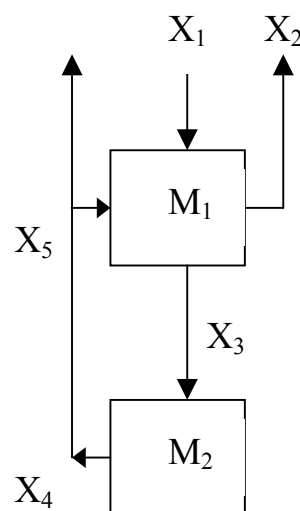
поверхности болот северной и средней тайги. Около 30-35 % болотных массивов на ключевых участках в этих подзонах занято сосново-кустарничково-сфагновыми болотами верхового типа, которые лишь в начале теплого периода функционировали как слабые источники метана, а большую часть времени поглощали метан из атмосферы.

#### 6.6 Особенности круговорота углерода в болотных экосистемах

До последнего времени среди экологов существовало представление о том, что вход углерода в экосистему определяется величиной чистой первичной продукции. Однако прямые сравнения величин газовых потоков на болотах с оценками образованного за вегетационный сезон растительного вещества показали явное несоответствие. В ходе дальнейших исследований была вскрыта основная причина – наличие внутреннего цикла, возвращающего углерод в экосистему, не позволяя ему рассеяться в атмосфере. На этой основе построена новая концептуальная и математическая модель биологического круговорота углерода в болотных экосистемах, рассчитана динамика торфонакопления.



А. Проточная система



Б. Циклическая система

Рисунок 8. Схема двухуровневой вертикальной структуры потоков углерода в болотных экосистемах:  $M_1$ - запас углерода в надземной фитомассе,  $M_2$ - внутрипочвенный пул углерода;  $X_1$ - фотосинтез,  $X_2$ - дыхание,  $X_3$ - транслокация, опад,  $X_4$ - эмиссия углекислого газа и метана,  $X_5$ - реассимиляция

Формально, новый акцент в интерпретации биологического круговорота углерода в болотных экосистемах соответствует переходу от общепринятой «проточной» схемы к «циклической» (рисунок 8). В соответствии с поставленными задачами были рассмотрены модельные системы с двумя трофическими уровнями. Такая функциональная структура позволяет наглядно показать роль внутреннего регуляторного механизма,

обеспечивающего высокую степень устойчивости и автономности болотной экосистемы (адаптация экосистемного уровня).

Соответствующие балансовые уравнения и стационарные значения запасов углерода на трофических уровнях, где параметры  $k_i$  представляют константы скорости соответствующих процессов, имеют следующий вид:

а) проточная система

$$\begin{cases} \frac{dM_1}{dt} = k_1 \cdot C - k_2 \cdot M_1 - k_3 \cdot M_1 \\ \frac{dM_2}{dt} = k_3 \cdot M_1 - k_4 \cdot M_2 \end{cases} \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1^* = \frac{k_1 \cdot C}{(k_2 + k_3)} \\ M_2^* = \frac{k_1 \cdot k_3 \cdot C}{(k_2 + k_3) \cdot k_4} \end{array} \right.$$

б) циклическая система

$$\begin{cases} \frac{dM_1}{dt} = k_1 \cdot C + \alpha \cdot k_4 \cdot M_2 - k_2 \cdot M_1 - k_3 \cdot M_1 \\ \frac{dM_2}{dt} = k_3 \cdot M_1 - k_4 \cdot M_2 \end{cases} \quad \left\{ \begin{array}{l} M_1^* = \frac{k_1 \cdot C}{(k_2 + k_3 - \alpha \cdot k_3)} \\ M_2^* = \frac{k_1 \cdot k_3 \cdot C}{(k_2 + k_3 - \alpha \cdot k_3) \cdot k_4} \end{array} \right.$$

Особенностью полученных общих решений является асимптотический характер временной динамики запасов углерода  $M_1$  и  $M_2$ , что согласуется с результатами прямых исследований торфяного разреза (Глебов и др., 1996). По нашим расчетам время выхода болотной экосистемы, соответствующей циклической модели, на квазистационарное значение  $M_2$  (отличающееся от стационарного менее, чем на 1 %) составит около 17 690 лет. Переход на новую концептуальную основу позволит скорректировать глобальные балансовые модели и обеспечит возможность более адекватного описания процессов, происходящих в биосфере.

## 7 ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЫХАНИЯ ПОЧВ

При рассмотрении проблемы используется эколого-географический подход, в соответствии с которым выделены три иерархических уровня: экосистемный, региональный и планетарный (глобальный). На низшем уровне географические закономерности проявляются в характере сезонной динамики эмиссии  $\text{CO}_2$  в зависимости от гидротермических условий местообитания. Выявлено несколько типов сезонной динамики: М, V и л-образные кривые. На региональном уровне преобладает влияние температурного фактора, который определяет продолжительность периода биологической активности. Эта особенность отражена в зональном характере распределения основных типов почв, но завуалированном местными условиями. На планетарном уровне распределение почв по величине годовой

эмиссии также определяется поступающим на поверхность тепловым потоком. Имеющиеся в сводках данные позволяют построить регрессионную параболическую зависимость дыхания почвы от географической широты. Лишь в регионах с исключительно засушливыми условиями в течение всего года общая закономерность плохо обусловлена.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Становление функции  $\text{CO}_2$ -газообмена «эмбриоземов», формирующихся в результате техногенной трансформации природных ландшафтов, имеет флуктуационный характер. Для сравнения динамичных почвенных объектов целесообразно рассматривать зависимость суммарной эмиссии от гидротермических условий как функцию отклика экосистемы, а условие равенства частных производных функции отклика по факторам среды использовать для определения их стандартных значений.
2. Функционирование газового поля черноземных почв сопряжено с образованием регулярных пространственно-временных структур, выявляемых по распределению концентрации углекислого газа в почвенном профиле; установленную закономерность целесообразно рассматривать как явление самоорганизации в почвенной среде, связанное с диссипативной функцией почвенного покрова (диссипация энергии).
3. Формирование зоны максимальной концентрации углекислого газа в почвенном профиле определяет интенсивность и регулярность углекислотного газообмена с нижележащими геологическими породами, приводящего к преобразованию литологической основы.
4. Содержание  $\text{CO}_2$  в газовой фазе определяет специфику функционирования пространственно распределенной карбонатно-кальциевой системы черноземных почв; в современных условиях почвообразования формирование и накопление карбонатов возможно лишь в верхнем контактирующем с атмосферой горизонте или на значительной глубине в почвенном профиле, если парциальное давление  $\text{CO}_2$  снижается и приближается к атмосферному. Карбонатные почвы субаридных территорий следует рассматривать как источник углекислого газа, поступающего в атмосферу.
5. Для болот в условиях лесной зоны Западной Сибири имеет место общая тенденция увеличения нетто-ассимиляции углерода, эмиссии углекислого газа и метана, а также содержания растворенных газов в болотной воде в направлении с севера на юг.
6. Содержание метана в атмосфере «северных» болот при относительно низком среднем фоновом значении концентрации имеет импульсный, нерегулярный характер. Широкое распространение многолетнемерзлых пород оказывает сдерживающее влияние на процессы метаногенеза и динамику газового состава атмосферы.

7. Специфической особенностью биологического круговорота углерода болотных экосистем является наличие малого внутреннего цикла, за счет функционирования которого формируется более 60 % чистой первичной продукции.
8. В географическом пространстве функция почвенного дыхания реализуется на трех иерархических уровнях: топологическом, региональном и планетарном. На низшем уровне особенности почвенного CO<sub>2</sub>- газообмена проявляются в различной сезонной динамике, определяемой местными гидротермическими условиями: М, V и Λ-образные кривые. На среднем и высшем уровне решающее значение имеет продолжительность теплого периода и величина теплового потока, поступающего на поверхность планеты, соответственно. Имеющиеся в сводках литературные данные позволяют аппроксимировать распределение почв мира по величине годовой эмиссии CO<sub>2</sub> параболической зависимостью от географической широты.

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

##### Монография:

Наумов А.В. Дыхательный газообмен и продуктивность степных фитоценозов / Отв. ред. О.А.Семихатова.- Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.- 95 с.

##### Патент:

RU 2001194 C1, 5 E 02 B 1/02, G 01 N33/24. Устройство для измерения интенсивности газообмена почвенных образцов / Наумов А.В. Приоритет 8.07.91 // Бюллетень изобретений.- 1993.- № 37-38.

##### Статьи:

1. Наумов А.В. О роли дыхательного газообмена в продуктивности естественных и культурных фитоценозов // Экология.-1978.-№ 1.-С.19-26.
2. Наумов А.В. Дыхание корневых систем // Ботанический журнал.- 1981.- Т.66.- № 8.- С.1099-1113.
3. Наумов А.В. К методике измерения дыхания отделенных органов растений в открытой газометрической системе с инфракрасным газоанализатором // Известия СО АН СССР. Сер. биол. наук.- 1985.- Вып.1.- С.36-41.
4. Наумов А.В. Динамика почвенного CO<sub>2</sub>- газообмена в луговых экосистемах различного хозяйственного использования // Экология.- 1991.- № 6.- С.6-12.
5. Наумов А.В. «Дыхание» почвенного субстрата в техногенных экосистемах КАТЭКа // Сукцессии и биологический круговорот / Отв. ред. В.М.Курачев.- Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма, 1993.- С.84-91.

6. Наумов А.В., Наумова Е.Н. Разложение корневой растительной массы в «молодых» почвах КАТЭКА // Почвоведение.- 1993.- № 5.- С.47-55.
7. Наумов А.В. Сезонная динамика и интенсивность выделения CO<sub>2</sub> в почвах Сибири // Почвоведение.- 1994.- № 12.- С.77-83.
8. Наумов А.В., Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. К вопросу об эмиссии углекислого газа и метана из болотных почв южного Васюганья // Сибирский экол. журн.- 1994.- № 3.- С.269-274.
9. Титлянова А.А., Наумов А.В. Потери углерода из почв Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение.- 1995.- № 11.- С.1357-1362.
10. Паников Н.С., Сизова М.В., Зеленев В.В., Махов Г.А., Наумов А.В., Гаджиев И.М. Эмиссия CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> из болот юга Западной Сибири: пространственное и временное варьирование потоков // Экологическая химия.- 1995.- Т. 4.- № 1.- С.13-23.
11. Паников Н.С., Глаголев М.В., Кравченко И.К., Мастепанов М.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Наумов А.В., Иноуэ Г., Максюттов Ш. Эмиссия метана из верховых болот Западной Сибири в зависимости от характера растительного покрова // Экологическая химия.- 1997.- Т. 6.- № 1.- С.59-67.
12. Наумов А.В. Дыхание растений и эмиссия углекислого газа в болотной экосистеме // Сибирский экол. журн.- 1997.- № 4.- С.385-391.
13. Наумов А.В. Принципы и методология почвенно-экологических исследований // Системный подход в почвоведении. Препринт. / Отв. ред. И.М.Гаджиев.- Новосибирск: ИПА СО РАН, 1997.- С.32-39.
14. Наумов А.В. Функционально-экологический аспект изучения CO<sub>2</sub>-газообмена болотной экосистемы // Системный подход в почвоведении. Препринт. / Отв. ред. И.М.Гаджиев.- Новосибирск: ИПА СО РАН, 1997.- С.44-48.
15. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танасиенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // Почвоведение.- 1998.- № 1.- С.51-59.
16. Glagolev M., Inisheva L., Lebedev V., Naumov A., Dement'eva T., Golovatskaja E., Erohin V., Shnyrev N., Nozhevnikova A. The emission of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in geochemically similar oligotrophic landscapes of West Siberia // Proceedings of the ninth symposium on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 2000 / Eds. M.Fukuda, Y.Kobayashi.- Sapporo, Japan, 2001.- P.112-119.
17. Naumov A.V. To the question of nature of methanotrophic complex in peat bog soils // West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present / Eds. S.V.Vasiliev, A.A.Titlyanova, A.A.Velichko. - Novosibirsk: Agenstvo Sibprint, 2001. - P.113-115.

18. Vasiliev S.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Naumov A.V., Bleuten W. Carbon balance in West Siberian mires // West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present / Eds. S.V.Vasiliev, A.A.Titlyanova, A.A.Velichko. - Novosibirsk: Agenstvo Sibprint, 2001. - P.143-146.
19. Vasiliev S.V., Naumov A.V. Carbon gas emission measurements by land unit // Carbon storage and atmospheric exchange by West Siberian peatlands / Eds. W.Bleuten, E.D.Lapshina. ISBN 90-806594-1-X.- Utrecht, Tomsk, 2001.- P.79-87.
20. Naumov A.V. Emission of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present / Eds. S.V.Vasiliev, A.A.Titlyanova, A.A.Velichko.- Novosibirsk: Agenstvo Sibprint, 2001. - P.110-112.
21. Наумов А.В. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // Сибирский экол. журн.- 2002.- № 3.- С.313-318.
22. Наумов А.В. Метан и углекислый газ в болотных экосистемах средней тайги (Западная Сибирь) // Вестник Томского гос. ун-та.- 2002.- Приложение № 2.- С.130-135.
23. Наумов А.В. Особенности круговорота углерода в болотных экосистемах // Вестник Томского гос. ун-та.- 2003.- Приложение № 7.- С.175-181.