

На правах рукописи

Курганова Ирина Николаевна

**ЭМИССИЯ И БАЛАНС ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ**

Специальность 03.00.27 – почвоведение

Специальность 03.00.16 – экология

АВТОРЕФЕРАТ

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

Москва – 2010

Работа выполнена в лаборатории почвенных циклов азота и углерода Учреждения Российской академии наук Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Московская обл.

Научный консультант – д.б.н., профессор В.Н. Кудеяров

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук,
член-корреспондент РАН,
Г.Н. Коровин
доктор биологических наук,
профессор **А.В. Смагин**
доктор биологических наук,
профессор **Л.К. Шевцова**

Ведущее учреждение: Почвенный институт им. Докучаева РАСХН

Защита состоится «___» _____ 2010 года в 15.30 в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета Д 501.001.57 при МГУ имени М.В. Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке факультета почвоведения МГУ.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета или присылать отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, ф-т Почвоведения, Ученый совет (или по факсу (4967) 330595).

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.С. Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и основания для исследования

В наземных экосистемах диоксид углерода атмосферы (или углекислый газ, CO₂) примерно на 25-40% имеет почвенное происхождение (*Bouwman and Germon, 1998; Смагин, 2005; Кудеяров и др., 2007*), а сам почвенный покров, в соответствии со своим положением на контакте атмосферы, литосферы и наземной фитосферы, занимает ключевую позицию в биосферном круговороте CO₂ и других газов (*Добровольский, 2003*). Несмотря на то, что почвенный покров Российской Федерации играет главенствующую роль в глобальном углеродном цикле нашей планеты (на долю России приходится примерно 1/8 часть поверхности суши), современная оценка основных составляющих углеродного цикла отсутствует как для отдельных зон, поясов и регионов, так и для территории России в целом.

CO₂ является также важнейшим парниковым газом, содержание которого в атмосфере в результате антропогенной деятельности значительно увеличилось по сравнению с доиндустриальной эпохой (*Базилевич и др., 1982; Глазовская, 1996; Bouwman et al., 1999; Заварзин, 2004*). В соответствии с ростом концентрации CO₂ увеличивается и глобальная температура воздуха (*Houghton et al., 1995; Chamard et al., 2003; Израэль, 2006; Tans, 2009*). Таким образом, через парниковый эффект биогенный цикл углерода связан с проблемой глобальных изменений климата, представляющих сегодня одну из важнейших экологических проблем. Актуальность процессов, обуславливающих изменение климата на планете, еще в прошлом столетии была признана на межправительственном уровне и выразилась в заключении в 1992 г. Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а в 1997 г. - Киотского протокола к ней. И хотя основной сферой деятельности, регулируемой Киотским протоколом, являются промышленные эмиссии парниковых газов (*Киотский протокол..., 1998*), он также касается изменений источников и стоков парниковых газов в лесном и аграрном секторах, которые напрямую связаны с деятельностью человека (*Данилов-Данильян, 2006; Семенов, 2006; Романовская, 2008*). Россия, присоединившаяся к Киотскому протоколу в 2005 году, тем самым взяла на себя обязательства принимать меры к уменьшению источников, увеличению стоков и сохранению резервуаров основных парниковых газов, каковым является CO₂ (*Заварзин, Кудеяров, 2006; Илларионов, Пивоварова, 2006*).

В начале 90-х годов прошлого столетия, в связи с системным кризисом, охватившим нашу страну, произошли существенные изменения в системе землепользования, выразившиеся в значительном сокращении площадей сельскохозяйственных угодий (и пашни в том числе) и превращении их в залежные земли (*Иванов, 2004; Хитров и др., 2008*). Эти изменения отразились как на величине, так и на направленности потоков CO₂ в системе растения – почва - атмосфера. Все это диктует необходимость переоценить запасы и баланс органического углерода (C_{орг}) в почвах России в результате изменений, которые произошли в системе землепользования после 1990 г.

Основная цель работы состояла в получении современных оценок эмиссии, баланса и запасов углерода в почвах различных экосистем южно-таежной зоны и территории России в целом.

Задачи исследования включали:

- Создание и детальный анализ базы данных по дыханию почв Российской Федерации;
- Изучение временной variability и получение количественных оценок годовых и сезонных потоков CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны России на основе непрерывных многолетних круглогодичных мониторинговых наблюдений;
- Оценку влияния основных экологических факторов (температура, влажность почвы, тип ценоза и почвы) на дыхательную активность почв;
- Изучение влияния экстремальных погодных явлений (процессы промерзания-оттаивания, засухи) на эмиссию CO_2 из почв;
- Разработку температурных зависимостей интенсивности дыхания почв в различных временных, температурных и влажностных интервалах;
- Создание карт и расчет общего, микробного и корневого дыхания почв в наземных экосистемах России на основе применения дифференцированной методологии оценки, моделирования и геоинформационного подхода;
- Оценку углеродного баланса в экосистемах залежей и на территории Российской Федерации в целом;
- Определение скоростей аккумуляции углерода и уточнение общего запаса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почвах России вследствие изменения системы землепользования после 1990 г.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований.

На базе модельного и геоинформационного подходов разработана новая методология оценки годовых потоков углекислого газа из почв с учетом землепользования и на ее основе получены как базовые (1990 г.), так и современные (2006 г.) оценки общего, микробного и корневого дыхания почв и баланса углерода на территории Российской Федерации. Применение дифференцированной методологии оценки позволило рассчитать средневзвешенные значения общего и микробного дыхания почв (с учетом доли различных категорий земель в пределах одного почвенного типа), находящихся в разных биоклиматических зонах, а также для основных категорий землепользования в различных природных зонах. На основе почвенной карты РСФСР и полученных значений общего, корневого и микробного потоков CO_2 из отдельных типов почв, составляющих легенду почвенной карты, была создана серия карт «Дыхание почв России», которые в своем роде являются уникальными, так как базируются на анализе фактического материала (наблюдения *in situ*).

Предложена новая эмпирическая модель и алгоритм расчетов для аппроксимирования величины годовых потоков CO₂ из почв Российской Федерации на основе суммарной летней эмиссии CO₂ из почв и среднегодовой температуры воздуха.

На основе непрерывных 11-летних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO₂ из почв пяти различных экосистем южно-таежной зоны получены устойчивые оценки годовых и сезонных потоков CO₂ из почв и впервые оценена их межгодовая вариабельность. Проведенные наблюдения *in situ* по своей детальности и временной продолжительности не имеют аналогов в своей области. Эмпирические зависимости, разработанные на основе этих данных, позволят с достаточно высокой степенью достоверности прогнозировать годовые, сезонные и суточные потоки CO₂ из почв южно-таежной зоны России, используя для этого легкодоступные абиотические параметры (количество осадков, температура почвы и др.). Выявлено, что на долю холодного периода приходится существенная часть в суммарном годовом потоке CO₂ из почв южно-таежной зоны и ее недоучет может привести к существенным искажениям в оценке величины годового баланса углерода в экосистемах.

Впервые для основных типов почв Российской Федерации получены оценки скоростей аккумуляции углерода в зависимости от длительности периода их восстановления после прекращения использования в сельскохозяйственном производстве, и на их основе рассчитаны изменения запасов углерода в почвах России. Показано, что залужение малопродуктивных пахотных почв может служить хорошей альтернативой лесоразведению с целью дополнительного связывания углерода, и поможет решить задачи, стоящие перед Россией в свете выполнения требований Киотского протокола.

Результаты исследований демонстрировались на 5-ой Международной выставке «Экоэффективность - 2008» (Москва, 2008), неоднократно включались в ежегодные отчеты, представляемые в Президиум РАН, как наиболее значимые достижения Института. Материалы диссертации используются в курсе лекций Пуцинского государственного университета «Учение о биосфере» и включены в коллективную монографию «Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России» (2007). Полученные современные оценки эмиссии, баланса и запасов углерода в почвах Российской Федерации целесообразно учитывать в Национальных сообщениях России Секретариату Рамочной конвенции ООН по климатическим изменениям.

Основные защищаемые положения

1. Дополнительный сток углерода в наземные экосистемы Российской Федерации в результате изменения системы землепользования после 1990 г. составил в среднем 74 Мт С/год. Запасы углерода в пахотном слое пост-агрогенных экосистем России в 1990-2005 гг. увеличились примерно на 252 Мт С.

2. Ведущим абиотическим фактором, определяющим величину годовых потоков углекислого газа из почв южно-таежной зоны России, является количество осадков за весенне-летний период, в то время как температура

почвы контролирует эмиссионные потоки CO₂ из почв в более коротких временных интервалах (среднесуточные и среднемесячные).

3. Доля летнего периода в суммарном годовом потоке CO₂ из почв на территории Европейского континента определяется среднегодовой температурой воздуха.

4. Эмиссия углекислого газа из почв южно-таежной зоны в холодный период года (с ноября по март) является существенной частью суммарного годового потока CO₂, составляя в среднем 25%.

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертацию, были представлены автором лично или в соавторстве на заседаниях Ученого Совета ИФХиБПП РАН (1998, 2000, 2002, 2003, 2004, 2006, 2008); *Scientific seminar in the Institute of Soil Science* (Göttingen, Germany, 1999); III (Суздаль, 2000), IV (Новосибирск 2004) и V (Ростов-на-Дону, 2008) съездах Общества почвоведов им В.В. Докучаева; I, II и III Национальных конференциях с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии» (Пушино, 2000, 2003, 2007); Международном симпозиуме "Функции почв в биосферно-геосферных системах" (Москва, 2001); *Scientific seminar in the International Institute for Applied System Analyses* (Laxenburg, Austria, 2001); 6-th (Sendai, Japan, 2001), 7-th (Boulder, Colorado, USA, 2005) и 8-th (Jena, Germany, 2009) *International Carbon Dioxide Conferences*; Всероссийской совещании "Лесные стационарные исследования: методы, результаты, перспективы" (Москва, 2001); *Scientific seminar in the Institute of Soil Science and Forest Nutrition* (Göttingen, Germany, 2001; 2004); International Conference "Extreme Phenomena in cryosphere: basic and applied aspects" (Pushchino, 2002); Annual Main Meeting of Society for Experimental Biology of Great Britain "Carbon balance in forest biomes" (Southampton, Great Britain, 2003); International Workshop "Practical Solutions for Managing Optimum C and N Content in Agricultural Soils" (Prague, Czech Republic, 2003, 2005); Всемирной конференции по изменению климата (Москва, 2003); European Science Foundation Conference "Processes underlying soil carbon fluxes" (Kiel, Germany, 2003); International Conference "Greenhouse gas emission from Agriculture – mitigation options and Strategies" (Leipzig, Germany, 2004); *Eurosoil Congresses* (Freiburg, Germany, 2004; Vienna, Austria, 2008); Национальной конференции «Биосферные функции почвенного покрова» (Пушино, 2005); International Conference "Element Balances as a Tool for Sustainable Land Management" (Tirana, Albania, 2005); International Conference "Modelling Soil Processes – measurement, uncertainty and modelling" (Aberdeen, Scotland, 2005); Международном рабочем совещании «Методы исследования органического вещества почв», (Владимир, 2005); *Fifth European Conference on Ecological Modelling* (Pushchino, 2005); *Conference on challenges in environment* (Stanford, California, USA, 2006); *Scientific seminar of Plant Science department in UC-Davis* (Davis, California, USA, 2006); *Kick-off meeting of the new TCO panel FAO – GTOS* (Rome, Italy, 2006); *Scientific seminar of Department of Forest Science and Environment, University of Tuscia* (Viterbo, Italy, 2006); International Conference "Climate Changes and their impact on boreal and temperate

forests” (Ekaterinburg, 2006); II Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию кафедры почвоведения Иркутского государственного университета «*Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем*» (Иркутск, 2006); *18-th World Congress of Soil Science* (Philadelphia, Pennsylvania, USA; 2006); International workshop “*Soil Respiration Database*” and Open Science Conference on *The GHG cycle in Northern hemisphere* (Sissi-Lassithi, Crete, Greece, 2006); International Symposium «*Soil Processes Under Extreme Meteorological Conditions*» (Bayreuth, Germany, 2007); International Symposium “*Organic matter dynamics in agroecosystems*” (Poitiers, France, 2007); International summer scientific school “*Environmental Studies in the Boreal Forest Zone*”(Федоровское, Россия, 2007); Международной научно-практической конференции «*Экология биосистем: проблемы изучения, индикации, прогнозирования*» (Астрахань, 2007); Final Conference of the ESF Programme «*The Role of Soils in the Terrestrial Carbon Balance*” (Nancy, France, 2007); IV Всероссийской научной конференции «*Гуминовые вещества в биосфере*» (Москва, 2007); Международной научно-практической конференции «*Плодородие почв – уникальный природный ресурс – в нем будущее России*» (Санкт-Петербург, 2008); Всероссийской научной конференции «*Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота*» (Москва, 2008); International Conference “*Man and environment in boreal forest zone: past, present and future*”(Федоровское, Россия, 2008); International Scientific Conference „*Soil in sustainable environment*” on the occasion of 50 – years jubilee of the *Lithuanian Soil Science Society* (Kaunas, Lithuania, 2008); 5-ой Международной выставке «*Экоэффективность - 2008*» (Москва, 2008); *European Geosciences Union General Assembly* (Vienna, 2009) и заседании кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 2009).

Личный вклад соискателя

В течение 1995-1997 гг. автором была создана компьютерная база данных «Дыхание почв России», а в 2001 гг. были разработаны подходы и методология дифференцированной оценки общего, корневого и микробного дыхания почвенного покрова на территории Российской Федерации, а также создана серия электронных карт «Дыхание почв России». В 1997 г. по инициативе и при участии соискателя были заложены площадки и начаты круглогодичные мониторинговые наблюдения по определению эмиссии CO₂ из почв в 5 различных экосистемах Южного Подмосковья, а с 1999 года по настоящее время автор является руководителем группы мониторинговых наблюдений за эмиссией углекислого газа из почв. В 2004 г. соискателем были инициированы работы по изучению баланса и определению запасов углерода в бывших пахотных почвах, выбывших из сельскохозяйственного использования. За все годы работы по теме диссертации (1995-2009 гг.) автор принимал самое непосредственное участие в планировании лабораторных экспериментов, организации различного рода полевых исследований, компьютерной обработке и анализе данных, обсуждении и публикации результатов.

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации и защищаемые положения отражены в 120 публикациях, среди которых: 1 коллективная монография, 28 статей в рецензируемых научных журналах (из них 19 - в изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации результатов диссертационных работ), 23 статьи – в сборниках и специальных выпусках, 68 работ – в сборниках тезисов российских и международных конференций и симпозиумов.

Организация исследований

Основная часть исследований выполнялась в Лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино, Московская область) в рамках плановых научно-исследовательских работ. Полевые наблюдения велись на территории Приокско-Террасного Государственного Биосферного Заповедника и Опытной-полевой станции ИФХиБПП РАН. Образцы почв для лабораторных экспериментов отбирались во время коротких экспедиционных поездок в различные регионы России (Владимирская, Курская, Воронежская, Волгоградская и Ростовская области) и Казахстана (Уральская область). На разных этапах работы эти исследования поддерживались Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации (проекты *«Глобальные изменения природной среды и климата: дыхание почв»*, **1995-2000** гг.; *«Биогенные стоки, источники и резервуары парниковых газов»*, **2000 - 2002** гг.), Министерством образования и науки РФ (Госконтракт № 43.016.11.1625; *«Методы оценки пулов и потоков парниковых газов в наземных экосистемах, обоснование механизмов их регулирования»*, **2003-2004** гг.), Программами Президиума РАН № 13 и № 16 (*«Глобальные изменения климата и природной среды»*, **2003-2008** гг.), Федеральным агентством лесного хозяйства (проект *«Методическое обеспечение лесохозяйственной деятельности и регулярных оценок эмиссии и стоков углерода лесами в условиях выполнения Российской Федерацией обязательств по Рамочной конвенции ООН об изменении климата и Киотскому протоколу»*, **2007-2008** г.). С 1998 г. по настоящее время автор является бессменным руководителем инициативных проектов Российского фонда фундаментальных исследований (*«Потоки диоксида углерода из почв южно-таежной зоны в осенне-зимне-весенний период»*, **1998-1999** гг.; *«Эмиссия диоксида углерода из почв в зависимости от гидротермических условий и землепользования»*, **2001-2003** гг.; *«Эмиссия и баланс углерода в почвах наземных экосистем России»*, **2004-2006** гг.; *«Потоки и пулы углерода в залежных землях России»*, **2007-2009** гг.) а также соисполнителем в других исследовательских проектах РФФИ.

Уточнение оценок общего и микробного дыхания почв Российской Федерации и создание серии электронных карт «Дыхание почв России» проводилось диссертантом в рамках Молодежной Летней Научной Школы (Проект *«Эмиссия диоксида углерода из почв наземных экосистем России»*,

июнь-август, 2001 г.) в Международном Институте Прикладного Системного Анализа (*International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria*).

Модельные эксперименты по изучению влияния процессов замораживания и оттаивания на интенсивность выделения CO₂ из почв различного землепользования проводились в Институте почвоведения и питания леса Геттингенского Университета (*Institute of Soil Science and Forest Nutrition, Göttingen, Germany*) в рамках краткосрочных научно-исследовательских грантов Немецкой службы академических обменов (1999 и 2004 гг.). Модельные эксперименты по влиянию температурно-влажностных условий на скорость выделения CO₂ из почв проводились в различные годы в ИФХиБПП РАН, а также в рамках Исследовательского Гранта американского фонда Джорджа Фулбрайта в Университете Дэвис (Калифорния, США, 2005-2006 гг.).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав, выводов, списка литературы, включающего 580 наименований, из которых 325 - на иностранных языках и приложений. Работа изложена на 310 стр. машинописного текста, содержит 49 рисунков, 54 таблицы. Приложения (73 стр.) помимо табличного материала содержат морфологические описания почв, детальную ботаническую характеристику и фотографии объектов исследования.

Благодарности

Автор премного благодарен зав. лабораторией почвенных циклов азота и углерода, директору ИФХиБПП РАН, д.б.н., проф. В.Н. Кудеярову который в конце 1995 года инициировал работы по созданию базы данных «Дыхание почв России» и оказывал всестороннее содействие и консультационную помощь на всех этапах работы. Самые теплые и искренние слова благодарности хочется выразить мужу, единомышленнику и соавтору большинства публикаций, к.т.н. В.О. Лопес де Гереню за постоянную помощь в проведении экспериментов, обработке данных и подготовке публикаций, а также за его бесконечную поддержку на всех этапах работы над диссертацией. Автор глубоко признателен научным сотрудникам ИФХиБПП РАН: к.б.н Т.Н. Мякшиной и к.б.н. Д.В. Сапронову, осуществляющим на протяжении многих лет непрерывные мониторинговые наблюдения за эмиссией CO₂ из почв, к.б.н. А.М. Ермолаеву – за помощь в определении продукционной составляющей луговых ценозов и составление ботанического описания на всех площадках исследований. Соискатель также благодарен к.б.н. В.И. Личко за безотказную помощь и содействие в проведении аналитических и полевых работ, гл. специалисту Л.Н. Розановой, на протяжении многих лет осуществлявшей хроматографический анализ газовых проб, вед. инженеру Е.М. Гульяевой - за помощь в проведении химических анализов почв и растений. За конструктивные замечания, ценные консультации и помощь в обсуждении результатов автор весьма признателен своим коллегам - к.б.н. А.А. Ларионовой, к.б.н. Благодатскому, к.б.н. И.В. Евдокимову. Большая помощь в выполнении полевых и лабораторных исследований на разных этапах работы была оказана в

рамках полевых и преддипломных практик студентами Воронежского Государственного Университета, РГАУ МСХА им. Тимирязева и Университета г. Лейпциг (Германия). Автор глубоко признателен д.б.н., проф. А.З. Швиденко и сотруднику Лесного отдела (Международный Институт Прикладного Системного Анализа, Лаксенбург, Австрия) Яну М'Каллуму (Jan McCallum) за продуктивные консультации и содействие в использовании геоинформационных программ. За помощь в планировании и осуществлении модельных экспериментов, обработке результатов, ценные предложения и конструктивные замечания автор глубоко признателен проф. Ф. Бизе (F. Beese), проф. Х. Флесса (H. Flessa), а также научным сотрудникам и соавторам Р. Типе (R. Teere), Р. Веллу (R. Well), Н. Лофтфильду (N. Loftfield) из Института почвоведения и питания леса Геттингенского Университета (Göttingen, Germany). Большая помощь в концептуальном и методическом плане на разных этапах работы была оказана проф. Я.В. Кузяковым (Университет Байройт, Германия), проф. Й. Сиксом (Johan Six) и Х. Ван Кесселем (Chris van Kessel) из Университета Дэвис (Калифорния, США), проф. Р. Валентини (R. Valentini) и научными сотрудниками Л. Белели Марчезини (L. Belleli Marchezini) и Н. Вюшардом (N. Vuichard) из Университета Тушиа (University of Tuscia, Viterbo, Italy).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Биогенный цикл углерода в наземных экосистемах и его основные составляющие (краткий обзор литературы).

Система биогеохимических циклов на нашей планете определяется циклом органического углерода, который полностью преобразовал состояние поверхностных оболочек Земли (Заварзин, 2004). Продукционная составляющая этого цикла в наземных экосистемах обусловлена ассимиляцией углерода в процессе фотосинтеза. Детальный анализ биологической продуктивности в различных экосистемах России и других регионов планеты нашел отражение в монографических работах Н.И. Базилевич, Л.Е. Родина и А.А. Титляновой (1971, 1993, 2008). Суммарные оценки чистой первичной продуктивности (ЧПП*) отдельных природных зон Российской Федерации представлены: по тундровым экосистемам - в работах Д.Г. Замолодчикова и Д.В. Карелина (1995, 1999, 2003, 2006, 2008); по лесным биогеоценозам – в обобщающих исследованиях А.С. Исаева и Д.Г. Коровина с соавт. (1993, 1995, 1999), А.З. Швиденко с соавт. (2000, 2003, 2008), А.И. Уткина, Д.Г. Замолодчикова и их коллег (2001, 2002). Впервые оценка общей величины ЧПП для территории Российской Федерации была получена А.Т. Мокроносовым и П.Ю. Ворониным с соавт. (1994, 1995, 1999). Впоследствии эта величина уточнялась разными исследователями (Мокроносов, Кудеяров, 1998; Nilsson et al., 2000; Воронин и др., 2004, 2005), и в настоящее время фотосинтетический сток углерода в растительный покров на территории России оценивается в пределах 4.41-4.73 Гт С/год (Воронин, Блэк, 2005; Кудеяров и др., 2007).

* Общий список принятых сокращений приведен в конце автореферата

Деструкционная ветвь цикла органического углерода более сложная: она объединяет все разнообразие процессов разложения органических материалов, а ее конечным продуктом является углекислый газ. Всю совокупность биохимических и физических процессов, приводящих, в конечном счете, к выделению углекислого газа, воды и энергии, запасенной в органических соединениях, характеризует «дыхание» почвы, которое является одной из ее наиважнейших функций (Кудеяров, 1994, 1999). В литературе термин «дыхание почвы» используется для обозначения разнообразных по своей природе процессов и явлений, а именно: воздухообмен между почвой и атмосферой; суммарное выделение (эмиссия) углекислого газа с поверхности почвы; скорость минерализации органического вещества и показатель ее биологической активности (Смагин, 1999, 2005; Наумов, 2004). Общее дыхание почвы (**ОДП**) можно условно разделить на два основных компонента: дыхание корней и связанной с ними ризосферной микрофлоры (**КД**) и дыхание собственно почвенных микроорганизмов - **МД** (Edwards et al., 1970; Ларионова, 1988; Кудеяров, 1994). Считается, что на долю собственно почвенного дыхания приходится от 2/3 до 1/2 общего потока CO₂ из почв (Singh, Gupta, 1977; Кобак, 1988; Благодатский и др., 1993; Кудеяров, 2004). Анализ опубликованных работ по экспериментальному определению ОДП показал, что в большинстве случаев авторы, оценивая дыхание почвы, определяли общую эмиссию CO₂ с поверхности почвы в атмосферу (Кудеяров и др., 1995). Это позволяет использовать такие понятия как дыхание почвы, эмиссия (выделение) CO₂ и поток CO₂ из почв в качестве синонимов. В зарубежной литературе перечисленные выше термины также отождествляются (Raich and Schlesinger, 1992; Rustad et al., 2000).

Температура и влажность почвы являются наиболее значимыми экологическими факторами, определяющими скорость деструкции органического вещества и интенсивность выделения CO₂ из почв (Kovalenko et al., 1978; Swift et al., 1979; Ларионова и др., 1993; Lomander et al., 1998; Максимов, 2007). Высокая положительная корреляция между скоростью выделения CO₂ и температурой почвы обнаруживается как в глобальном масштабе (Fung et al., 1987; Raich and Schlesinger, 1992; Kirschbaum, 2000; Raich et al., 2002), так и для почв отдельных экосистем и регионов (Lloyd and Taylor, 1994; Ялынская, 1999; Лонес де Гереню и др., 2001; Perrin et al., 2003; Tonon et al., 2006 и мн. др.). Традиционно количественную оценку влияния температуры и влажности на величину дыхания почвы проводят, используя либо линейные, либо экспоненциальные регрессионные модели (Schleser, 1982; Brumme, 1995; Katterer et al., 1998; Lopes de Gerenyu et al., 2001; Zamolodchikov, Karelin, 2001; Reicshstein et al., 2003, 2005; Pavelka et al., 2007; Larionova et al., 2007). Было выявлено, что температурный коэффициент Q₁₀, рассчитанный для почвенного дыхания на основе экспоненциальных моделей, в течение года не является величиной постоянной: существует тенденция его уменьшения с ростом температуры и уменьшением влажности (Kirschbaum, 1995; Rayment, Jarvis, 2000). Большинство же эмпирических моделей основано на корреляции между сезонной изменчивостью почвенного дыхания в зависимости от температуры и, таким образом, дает постоянный температурный коэффициент для

всего сезона, искажая реальную величину дыхания почв в менее продолжительных временных промежутках (*Janssens, Pilegaard, 2003*). Все вышесказанное определило ряд задач настоящего исследования.

Первая, очень приблизительная оценка общей эмиссии CO_2 почвенным покровом Российской Федерации была получена *В.Н. Кудеяровым с соавт.* (1995). Она учитывала потоки CO_2 из почв только за вегетационный период и составила 3.12 Гт С/год. Позднее, когда было показано, что за пределами вегетации растений из почв выделяется 12-47% годового потока CO_2 (*Курганова, Кудеяров, 1998*), величина суммарной эмиссии углекислого газа из почв России была уточнена и составила 4.50 Гт С/год (*Kudeyarov, Kurganova, 1998*). Величина МД почв Российской Федерации оценивалась по его средней доле (2/3 от ОДП) без учета типа землепользования и, в соответствии с оценками различных исследователей, варьировала от 2.6 до 3.2 Гт С/год (*Кудеяров, 2000; Nilsson et al., 2000*). Приведенные величины общего и микробного дыхания почв России нельзя признать окончательными из-за того, что они базировались на простых средних величинах эмиссии CO_2 и не учитывали соотношение площадей различных классов землепользования в пределах одного типа почв, которое в свою очередь зависит от конкретной биоклиматической зоны. В связи с этим, более корректным представляется использование дифференцированного подхода для оценки величин ОД и МД почв России с использованием средневзвешенных значений почвенного дыхания, позволяющих учесть влияние растительности на эмиссионную составляющую углеродного цикла.

Дисбаланс между продукцией и деструкцией органического углерода определяет то его количество, которое выводится из цикла $\text{C}_{\text{орг}}$ и выражается в изменении концентрации углекислого газа в атмосфере (*Заварзин, 1994, 2004*). Таким образом, функция наземных экосистем в качестве источника или стока CO_2 определяется балансом между фотосинтетической продукцией $\text{C}_{\text{орг}}$ (ЧПП) и выделением CO_2 при разложении органического вещества (МД) и характеризуются величиной чистой экосистемной продукции (ЧЭП). Третьим немаловажным компонентом при расчетах баланса углерода для отдельных территорий является антропогенная эмиссия CO_2 (сжигание топлива, продукция аграрного сектора, заготовка и разложение древесины, добыча торфа, лесные пожары и болезни, известкование почв и др.). Согласно оценкам и прогнозам Международного Института Прикладного Системного Анализа, территория России в 1990 г. (базовый год для стран-участниц Киотского протокола) выступала как источник CO_2 в размере 0.53 Гт С/год и будет оставаться таковым в 2008-2012 гг. (*Nilsson et al., 2000*). В соответствии с расчетами, проведенными в разное время в ИФХиБПП РАН, Российская Федерация, напротив, являлась абсолютным стоком углерода в размере 0.81-1.10 Гт С/год (*Кудеяров, 2000, 2004; Kudeyarov, Kurganova, 2006*) как в 1990, так и в 2002-2006 гг. Оценка баланса углерода в наземных экосистемах России, полученная *А.З. Швиденко с соавт.* для 2005 г., также свидетельствует в пользу преобладания стока углерода над его потерями и оценивается величиной 0.49 Гт С/год (*Shvidenko et al., 2009*). Неоднозначные оценки баланса углерода на

территории Российской Федерации, имеющиеся в литературе, а также колоссальные изменения, произошедшие в системе землепользования в России в начале 90-х гг. прошлого столетия, требуют уточнения существующих величин баланса CO₂ на территории России.

Основным и долговременным резервуаром органического углерода на территории нашей страны наряду с торфами, является почвенное органическое вещество, **ПОВ** (Орлов, Бирюкова, 1995; Заварзин, 2006), которое включается в чистую биомную продукцию (**ЧБП**) экосистем (Steffen et al., 1998; Кудеяров, 2000; Кудеяров и др., 2007). Любые изменения в системе землепользования неизбежно приводят к изменениям запасов ПОВ (Houghton, 1999, 2003; Семенов, 2006). Так, интенсивная распашка почв в середине прошлого столетия инициировала значительные потери почвенного углерода (Хмелев, 1989; Кирюшин и др., 1993; Титлянова, Наумов, 1995; Титлянова и др., 1998), а выведение почв из сельскохозяйственного использования, напротив, приводило к накоплению углерода как в почвах, так и в растениях, которые на них развивались (Vesterdal et al., 2002; Poulton et al., 2003; Ларионова и др., 2006). Особенности изменений свойств почв и растительности в пост-агрогенных экосистемах, образованных в течение последних двух десятилетий на месте стихийно заброшенных сельхозугодий, нашли детальное отражение в работах коллектива авторов из Института географии РАН (Люри и др., 2006, 2008; Горячкин и др., 2008; Караваева, Денисенко, 2008, 2009), О.А. Анциферовой (2001, 2002, 2005), Г.С. Базыкиной с соавт. (2004, 2007), А.С. Владыченского с соавт. (2006, 2007), Л.Н. Коробовой (2007), А.В. Литвиновича с соавт. (2004, 2005, 2006, 2008), А.А. Романовской (2006, 2008), О.А. Сорокиной (2007, 2008), Н.И. Сухановой с соавт. (2007, 2008), L. Belleli Marchezini (2007), О. Калининой с соавт. (Kalinina et al., 2009) и многих других. Первая, очень приближенная оценка общего накопления углерода в почвах РФ в результате изменения землепользования была сделана Ларионовой с соавт. (Larionova et al., 2003) и составила 660 Мт С для площади 34 млн. га за период с 1990 по 2002 год. Согласно расчетам международного коллектива авторов (Vuichard et al., 2008), выполненных с использованием модели «ORCHIDEE», величина общей С-аккумуляции в пост-агрогенных почвах бывшего СССР оценивается величиной 64 Мт С (1991-2000 гг.). Оценки изменения запасов углерода в бывших пахотных почвах России, полученные при помощи модели RothC, варьировали в очень широких пределах - от абсолютных потерь С в количестве 5.5 Мт С за период с 1990 по 2002 год (Романовская, 2006) до его значительного накопления в размере 248 Мт С практически за тот же период (Романовская, 2008). Столь разноречивые оценки общего накопления С в почвах России обусловлены, с одной стороны, недостатком фактических данных, отражающих скорости изменения запасов углерода в пост-агрогенных почвах, а с другой – колоссальным варьированием площадей бывших пахотных угодий, которые авторы использовали при расчетах. В этой связи, в представляемой работе на основе обобщения имеющихся литературных данных и собственного фактического материала, были проведены расчеты общего накопления углерода в почвах пост-агрогенных экосистем с использованием как традиционных, так и современных подходов.

Глава 2. Методология, объекты и методы исследования

Создание база данных «Дыхание почв России». В рамках диссертационного исследования были собраны и детально проанализированы все доступные экспериментальные данные по определению *in situ* эмиссии CO₂ почвами России, опубликованные в отечественной и зарубежной литературе начиная с 50-х годов прошлого столетия. Каждая запись в созданной базе данных (БД) включала следующие характеристики: природно-климатическая зона, район исследований и его географические координаты; среднегодовая температура воздуха; тип почвы и ее подробное таксономическое описание; тип растительности (ценоз); продолжительность периода измерений; годовая, сезонная и суточная динамика выделения CO₂ из почв в связи с изменением температуры и влажности почвы, уровня грунтовых вод и температуры воздуха; метод определения эмиссии CO₂ из почв; автор и год исследований (Курганова, Кудеяров, 1998; Кудеяров, Курганова, 2005). Данные по интенсивности выделения (ИВ) CO₂ почвами были приведены к одинаковым единицам измерения (мг С/м²/сут) и затем рассчитывались среднемесячные и средние за летний период (июнь-август) потоки CO₂ из отдельных типов почв, приуроченных к различным растительным ассоциациям. Созданная база данных постоянно обновляется и в настоящее время она содержит 415 записей и базируется на 103 литературных источниках.

Организация многолетних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO₂ из почв различных экосистем. Район исследований расположен в самой южной оконечности южно-таежной зоны (подзона смешанных и широколиственных лесов). Согласно многолетним метеонаблюдениям (1988 – 2008 гг.), проводимым на Станции комплексного фоновоего мониторинга (п. Данки, Серпуховский район Московской области), среднегодовая температура воздуха в районе исследований составляет приблизительно +5.5°C, а среднегодовая сумма осадков - 647 мм. Непрерывные наблюдения за эмиссией диоксида углерода проводили в пяти различных экосистемах, расположенных на ***дерново-слабоподзолистой супесчаной почве*** (Приокско-Тerrasный Государственный Биосферный Заповедник; п. Данки Серпуховского района Московской обл., 54°55'N 37°34'E) и на ***серой лесной среднесуглинистой почве*** (Опытно-полевая станция ИФХиБПП РАН, г. Пущино Московской обл., 54°50'N 37°37'E). ***Лесной ценоз дерново-слабоподзолистой почвы*** заповедника (С_{общ} 1.9%, рН_{водн} 5.6) представлен смешанными породами деревьев (4С3Л2О1Б ед Д.), возраст которых составляет 80-100 лет, и характеризуется хорошо развитым травянистым ярусом. Площадка ***лугового ценоза*** (С_{общ} 2.2%, рН_{водн} 5.4) представляет собой косимый неудобряемый луг после 45-50 лет залужения пахотной почвы. На ***серой лесной среднесуглинистой почве*** площадки наблюдений располагались: в ***лесном ценозе*** (С_{общ} 2.7 %, рН_{водн} 6.8), представляющем собой вторичный лиственный лес (5О3Л2К ед. Д и Б; средний возраст деревьев 40-50 лет), ***луговом ценозе-1*** - некосимый неудобряемый луг после 15 лет стихийного залужения экспериментальных деленок ИФХиБПП РАН сорно-луговыми видами; ***луговом ценозе-2*** - периодически косимый неудобряемый вариант после залужения бывшей пашни злаково-бобовой

смесью в 1989 г. в районе ОПС ИФХиБПП РАН ($C_{\text{общ}}2.2\%$, $pH_{\text{вод}}6.5$) и агроценозе - неудобряемый вариант полевого опыта (5-польный зернопаровой севооборот, $C_{\text{общ}}1.1\%$, $pH_{\text{водн.}}6.0$).

Измерение интенсивности выделения CO_2 проводили с поверхности почв методом закрытых камер, круглогодично, с ноября 1997 по октябрь 2008 года с периодичностью один раз в 7-10 дней. Календарный год исследований был условно разделен нами на два периода: теплый (или бесснежный) - с мая по октябрь и холодный (преимущественно со снеговым покровом) - с ноября по апрель. Методики отбора газовых проб в теплый и холодный периоды отличались друг от друга по размеру используемых камер, числу повторностей и времени экспозиции (*Lopes de Gerenio и др., 2001, 2005; Kurganova et al., 2003; Курганова и др., 2004, 2007*). Анализ газовых проб проводили в день отбора с использованием газовых хроматографов («Chrom-5», ЧССР или «Кристалл-2000», Россия). На выбранных мониторинговых площадках в течение всего периода наблюдений параллельно с отбором газовых проб определяли температуру ($T_{\text{п}}$) и влажность ($W_{\text{п}}$) верхнего слоя почвы (0-5 см), температуру воздуха, а в зимний период также фиксировали высоту снежного покрова.

Оценка влияния гидротермических параметров на ИВ CO_2 из почв в рамках диссертационного исследования проводилась дифференцированно. С этой целью были построены эмпирические регрессионные модели и рассчитаны температурные коэффициенты Q_{10} для всего ряда данных, полученных в ходе непрерывных мониторинговых наблюдений (число измерений $n > 390$), отдельно для каждого года ($n = 32-48$) и для различных календарных сезонов года ($n = 49-201$) в четырех типах экосистем (лесной и луговой ценозы на дерново-слабоподзолистой почве, лесной и агроценоз на серой лесной почве). Для вычисления температурных коэффициентов Q_{10} , показывающих во сколько раз увеличивается интенсивность выделения CO_2 при повышении температуры на $10^\circ C$, использовали линейное регрессионное уравнение между натуральным логарифмом ИВ CO_2 и температурой верхнего слоя почвы (*Amthor, 1994; Pavelka et al., 2007*):

$$\ln \text{ИВ } CO_2 = k \cdot T_{\text{п}} + b \quad (1),$$

а затем Q_{10} рассчитывали в соответствии с формулой:

$$Q_{10} = \exp(10 \cdot k) \quad (2).$$

Влияние процессов промерзания-оттаивания на потоки CO_2 из почв изучалось нами в рамках лабораторного эксперимента 1 на ненарушенных монолитах лесной ($C_{\text{общ}}3.4\%$, $pH_{\text{вод}}4.3$) и пахотной ($C_{\text{общ}}1.2\%$, $pH_{\text{вод}}7.9$) буроземной почвы (Нижняя Саксония, Германия, $52^\circ 30' N$, $9^\circ 55' E$) при двух уровнях влажности (65 и 100% их полной полевой влагоемкости, **ППВ**). Монолиты помещали в морозильную камеру и подвергали двум циклам промерзания-оттаивания (**ЦЗО**), изменяя температуру от $+10^\circ C$ (теплый период) до $-5^\circ C$ (период промерзания). Каждый цикл продолжался 14 дней, из которых 6 дней почвы находились в полностью замерзшем состоянии. Измерения скорости выделения CO_2 из почв проводились каждые два часа с помощью автоматизированной газовой-хроматографической системы (*Loftfield et al, 1997*).

Влияние типа растительности на дыхательную активность основных типов почв Европейской части России (дерново-слабоподзолистая, серая лесная, чернозём типичный, лугово-каштановая, солонец солончаковый), большая часть которых имела аналоги в лесных, луговых (степных или пастбищных) и агро- ценозах, также оценивалось нами в контролируемых условиях модельного опыта (**лабораторный эксперимент 2**). С этой целью почвенные образцы, отобранные методом конверта из верхнего слоя почвы (0-10 см), освобождали от живых корней, просеивали через сито диаметром 2 мм, увлажняли из расчета 30, 60 и 90% их ППВ, и последовательно инкубировали в термостате при температурах: 25, 20, 15, 10, 5, 0 и -5°C . Интенсивность выделения CO_2 определяли в газовых пробах, взятых из флаконов после 12-24 часов накопления (в зависимости от температуры).

Определение баланса углерода в экосистемах залежей проводилось в 2004 и 2007 гг. на территории ОПС ИФХиБПП РАН на бывших пахотных почвах, которые в разное время были выведены из сельскохозяйственного использования (1, 4, 5, 8, 10, 13, 25 и 28 лет назад). Залежи 13-летнего возраста были представлены двумя вариантами: косимый участок и некосимый, периодически подвергаемый весеннему пирогенному воздействию. ЧПП в залежных экосистемах в 2004 году определяли как сумму надземной и подземной продукции в период максимального развития травостоя, а в 2007 году - рассчитывали на основе динамических наблюдений за продуктивностью залежных экосистем в течение всего летнего сезона, используя балансовые уравнения (Титлянова, 1977; Методы изучения....., 1978). МД почв оценивали, исходя из величины ОДП, представляющего собой сумму корневого и микробного потоков CO_2 . На пашне и зрелых залежах (25 и 28 лет) измерения ОДП проводили закрытым камерным методом еженедельно в течение всего года, а на более молодых залежах - только в течение летнего периода (июнь-август). Величину МД пост-агрогенных почв оценивали, принимая во внимание долю корневого дыхания в общем потоке CO_2 , которая в луговых экосистемах, согласно ранее проведенным исследованиям, в летний период составляла 36%, а за его пределами – 24% (Ларионова и др., 2003).

Определение различных пулов органического углерода и времени их обрачиваемости в почвах пост-агрогенных экосистем проводили на примере черноземов обыкновенных (Ростовская обл., $47^{\circ}16'N$ $39^{\circ}21'E$) и серых лесных почв (Московская обл., $54^{\circ}50'N$ $37^{\circ}37'E$). С этой целью под пашней и залежами различного возраста (хроноряды) определяли содержание общего, микробного, лабильного (легкоминерализуемого, $C_{\text{лаб}}$) и стабильного (трудно-минерализуемого, $C_{\text{стаб}}$) пулов углерода. Образцы почв отбирали из бывшего пахотного слоя (0-20 см), как наиболее подверженного изменениям. Содержание $C_{\text{орг}}$ оценивали методом бихроматного окисления, микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) – методом субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 1978), лабильного и стабильного пулов углерода – биокинетическим методом (Семенов и др., 2006) в длительных инкубационных экспериментах. Содержание $C_{\text{лаб}}$ и $C_{\text{стаб}}$ рассчитывали по кумулятивным кривым выделения CO_2 с использованием двухкомпонентной экспоненциальной модели (Katterer et al., 1998).

Определение скорости аккумуляции углерода в почвах Российской Федерации было основано на обобщении литературных данных и анализе результатов собственных исследований, проведенных на залежах различного возраста, приуроченных к основным типам почв: дерново-подзолистой, серой лесной, чернозему обыкновенному и каштановой. На серой лесной почве и черноземе были выбраны сукцессионные хроноряды, включающие обрабатываемую почву (пашню) и пост-агрогенные угодья различной степени (длительности) восстановления: 2, 6, 11 и 26 лет – на серой лесной почве и 5, 11, 21 и 77 лет на черноземе обыкновенном. На дерново-подзолистой и каштановой почвах исследования проводили только на обрабатываемой почве и залежи одного возраста: 12 лет - на дерново-подзолистой почве и 15 лет – на каштановой почве. Скорость накопления углерода ($C_{\text{акк}}$, г С/м²/год) оценивали по разности запасов органического углерода (г С/м²) в залежи ($C_{\text{зал}}$) и современной обрабатываемой почве (C_n), отнесенной к возрасту залежи ($ДВ$, лет):

$$C_{\text{акк}} = (C_{\text{зал}} - C_n) / ДВ \quad (3).$$

Оценка величины общего накопления углерода в пост-агрогенных почвах России после 1990 г. проводилась с использованием трех основных подходов: аппроксимационные расчеты, почвенно-геоинформационный анализ и моделирование. Аппроксимация – это самый грубый способ оценки, представляющий собой простое умножение площади пашни, выведенной из сельскохозяйственного использования на среднюю скорость накопления углерода за первые 15 лет восстановления почв. Имеющиеся у нас данные позволили провести аппроксимационные расчеты дифференцированно, а именно, принимая во внимание разную скорость накопления $C_{\text{орг}}$ в различных типах почв и учитывая разную представленность (долевое участие) основных типов почв в сельскохозяйственном производстве различных регионов РФ. Использование почвенно-геоинформационного подхода, позволило, при помощи наложения Политической и административной карты СССР (Михайленко, Бобков, 1988), Почвенной карты РСФСР (Фридланд, 1988) и Карты категорий земель СССР (Январева, 1989), рассчитать площади пахотных угодий в каждом регионе РФ в соответствии с их типовой принадлежностью. Все разновидности почв, представленные в легенде карты, были объединены в 5 больших групп: дерново-подзолистые почвы, серые лесные почвы, черноземы, каштановые и «прочие» почвы. На основе имеющихся данных, площади почв в пяти различных группах оценивали в каждом из административных округов РФ двумя путями: (1) - в равных пропорциях, предполагая, что исключение почв из сельскохозяйственного оборота шло независимо от их типовой принадлежности и плодородия, и (2) – дифференцированно, полагая, что в первую очередь в регионах забрасывались почвы менее плодородные. Модельный подход подразумевал использование разработанных нами логарифмических моделей для оценки скоростей накопления $C_{\text{орг}}$ в почвах в зависимости от длительности периода, в течение которого почвы не обрабатывались. В этом случае площади пашни, выведенной из сельскохозяйственного оборота, учитывались дифференцированно для каждого года в общем интервале с 1990 по 2005 год.

Глава 3. Анализ базы данных «Дыхание почв Российской Федерации»

Анализ географической принадлежности экспериментальных площадок по определению эмиссии CO_2 , включенных в созданную БД, показал (рис. 1), что охваченность территории России подобными исследованиями очень неравномерна: большинство наблюдений за ИВ CO_2 из почв проводилось в центральном регионе Европейской части России ($50\text{-}60^\circ\text{N}$, $30\text{-}40^\circ\text{E}$). До сих пор слабо изученными в отношении почвенного дыхания остаются районы Дальнего Востока, горные и полупустынные регионы. Отсутствие экспериментальных исследований в этих областях представляет основную трудность и значительно увеличивает неопределенности оценок общего дыхания почв Российской Федерации. Было найдено, что различные категории землепользования также характеризуются неодинаковой изученностью: на долю агроценозов приходится 36% от числа изученных экосистем, на долю лесных биоценозов – 29%, луговых – 19%.

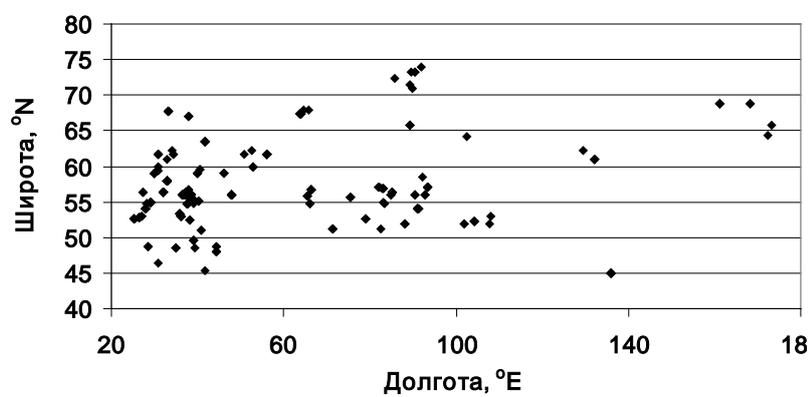


Рис. 1. Расположение площадок, на которых проводились определения дыхания почвы, в соответствии с их географическими координатами.

Анализ БД показал также, что изучение эмиссии CO_2 из почв проводилось в последние 60 лет неравномерно (рис. 2А), а большинство исследований охватывали лишь летние месяцы или вегетационный сезон (май-сентябрь). В снежный период (ноябрь-март) измерение эмиссии CO_2 с поверхности почвы проводилось в единичных случаях (рис. 2Б). Практически полное отсутствие круглогодичных мониторинговых наблюдений за эмиссией CO_2 из почв представляет собой серьезное препятствие для получения реальных оценок суммарного годового потока CO_2 из почв Российской Федерации.

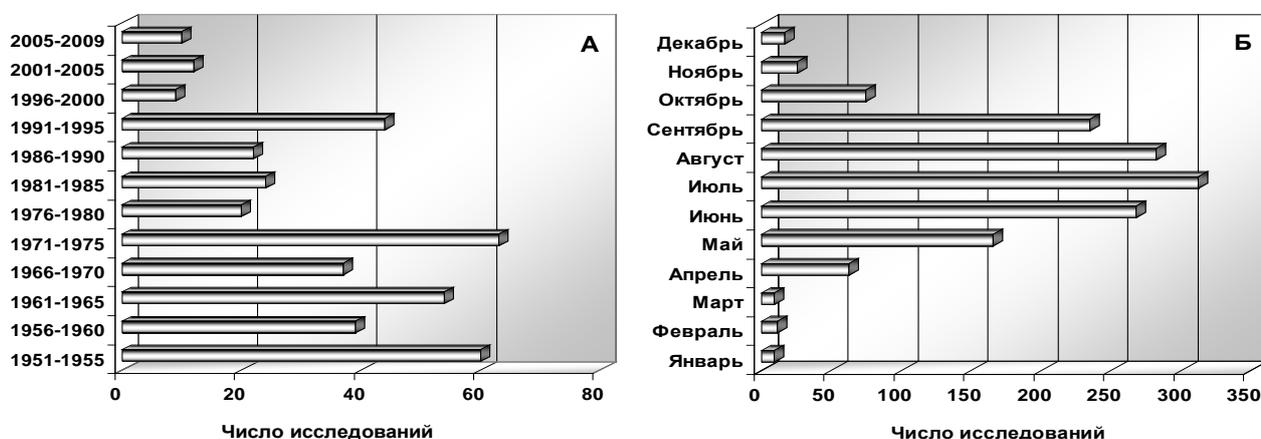


Рис. 2. Гистограммы распределения числа наблюдений за эмиссией CO_2 из почв на территории РФ в различные годы (А) и по отдельным месяцам в течение года (Б).

Поскольку большинство исследований, представленных в базе данных, охватывали лишь летний (и/или вегетационный) период, то для подавляющего большинства экосистем были рассчитаны летние (июнь-август) потоки CO_2 из почв, гистограмма распределения которых представлена на рис. 3.

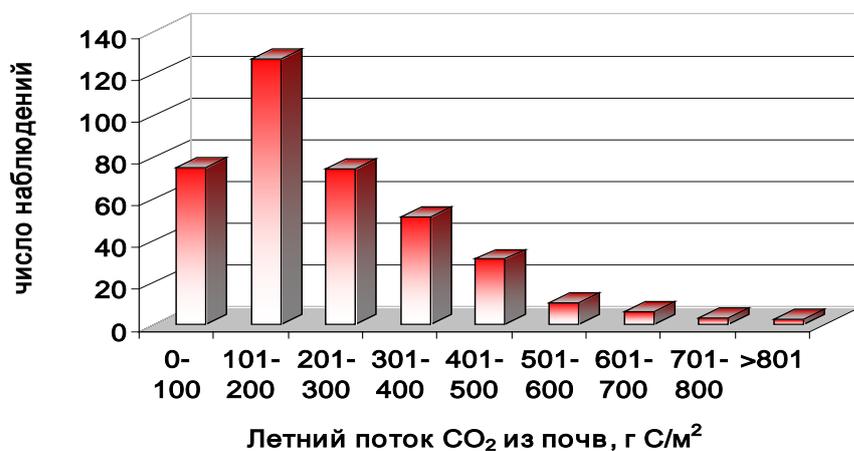


Рис. 3. Гистограмма распределения суммарных летних потоков CO_2 из почв Российской Федерации.

Расчеты показали, что в 86% случаев суммарная летняя эмиссия CO_2 из почв составляет не более $400 \text{ г C}/\text{m}^2$, а около 50% экосистем, представленных в базе данных, характеризуются летними потоками CO_2 , не превышающими $200 \text{ г C}/\text{m}^2$. Было найдено, что самые низкие потоки CO_2 из почв в летний период были характерны для горно-тундровых почв и глееземов тундровых ($31\text{-}60 \text{ г C}/\text{m}^2$), а самые высокие - для черноземов, используемых в сельском хозяйстве, и для осушенных торфяных почв ($512\text{-}727 \text{ г C}/\text{m}^2$).

В рамках созданной БД, на достоверность различий было проанализировано 56 пар естественных растительных ассоциаций и 115 пар агроценозов, расположенных на идентичных типах почв. Выявлено, что в 50% случаев тип растительности значимо ($F < 0.10$) влиял на величину потока диоксида углерода из почв (Курганова, Кудеяров, 1998). Таким образом, для адекватной характеристики потоков CO_2 из почв отдельных типов более корректно использовать не простое (арифметическое) среднее, а средневзвешенные значения, учитывающие соотношение различных категорий земель в пределах одного почвенного типа (Кудеяров, Курганова, 2005).

Расчеты коэффициентов парной корреляции между ИВ CO_2 и основными гидротермическими параметрами, проведенные нами в рамках БД (34 экосистемы), показали, что корреляционная связь между скоростью эмиссии CO_2 и температурой верхнего слоя почвы почти всегда положительная и наиболее тесная в подзолистых почвах естественных ценозов северо- и среднетаежной зон ($R=0.54\text{-}0.79$, $\alpha=5\%$). Эта связь ослабевает в экосистемах южно-таежной зоны, а также в почвах агроценозов и в почвах под вырубками (Курганова, Кудеяров, 1998; Kudeyarov and Kurganova, 1998). Корреляционная зависимость между ИВ CO_2 и влажностью верхнего слоя почвы менее тесная и может быть как положительной, так и отрицательной. Для осушенных торфяных почв агроценозов была обнаружена тесная положительная корреляция ($R=0.82\text{-}0.86$, $\alpha=1\text{-}5\%$) между потоками диоксида углерода и уровнем грунтовых вод.

Глава 4. Многолетний мониторинг эмиссии CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны

Круглогодичные наблюдения за ИВ CO₂ из почв в пяти различных экосистемах показали, что величина потока диоксида углерода из почв характеризовалась высокой временной и пространственной вариабельностью (рис. 4). В холодный период года (ноябрь-апрель) скорость выделения CO₂ на изучаемых объектах хотя была и выше нуля, но, как правило, не превышала 75-100 мг С/м²/час. В теплое время года (май-октябрь) ИВ CO₂ из почв южно-таежной зоны в большей степени зависела от погодных условий и была в среднем в 3.5-4.5 раза выше, чем в холодный период. За все годы наблюдений (за исключением засушливых 2002 и 2007 гг.) значения ИВ CO₂ в теплый период практически не опускались ниже 100 мг С/м²/час, достигая иногда весьма значительных величин – 250-380 мг С/м²/час.

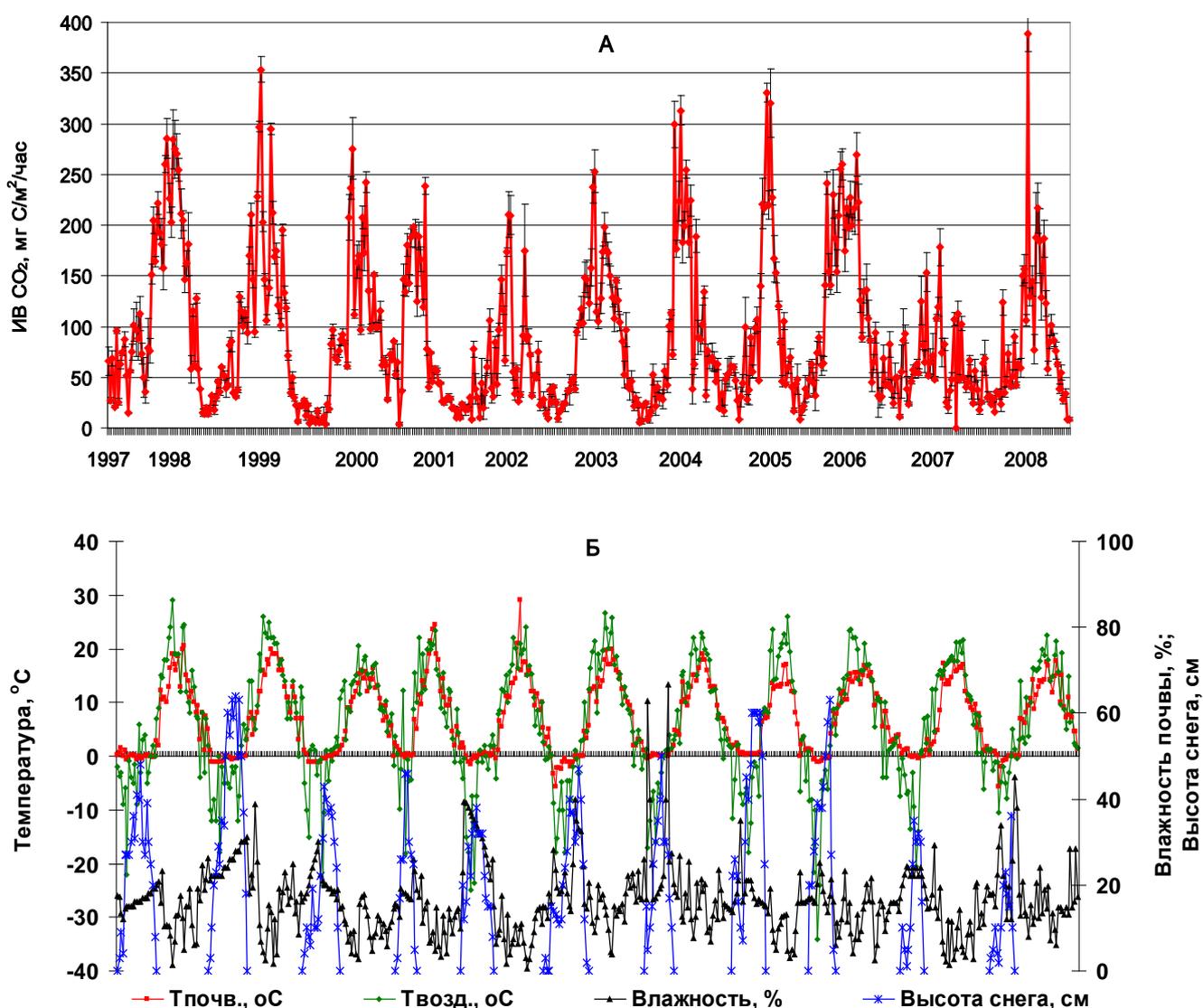


Рис. 4. Многолетняя динамика среднесуточной интенсивности выделения CO₂ из дерново-слабоподзолистой почвы под луговым ценозом (А) и некоторых гидротермических характеристик (Б). (Вертикальные линии показывают величину стандартной ошибки, SE).

Для всего 11-летнего ряда данных обнаружены тесные положительные связи между среднесуточной ИВ CO_2 из почв и температурой почвы ($R^2=0.28-0.65$; рис. 5). Отклик изученных почв на повышение температуры убывал в следующей последовательности: Луговой ценоз (дерново-подзолистая почва) = Луговой ценоз-2 (серая лесная почва) > Лесной ценоз (дерново-подзолистая почва) > Лесной ценоз (серая лесная почва) > Луговой ценоз-1 (серая лесная почва) > Агроценоз (серая лесная почва). Основная причина обнаруженных различий в температурной чувствительности почв заключается, по-видимому, в том, что в указанном ряду почв убывает количество тонких корней, которые дают более заметный отклик на повышение температуры по сравнению с массой почвы без корней (Boone et al., 1998).

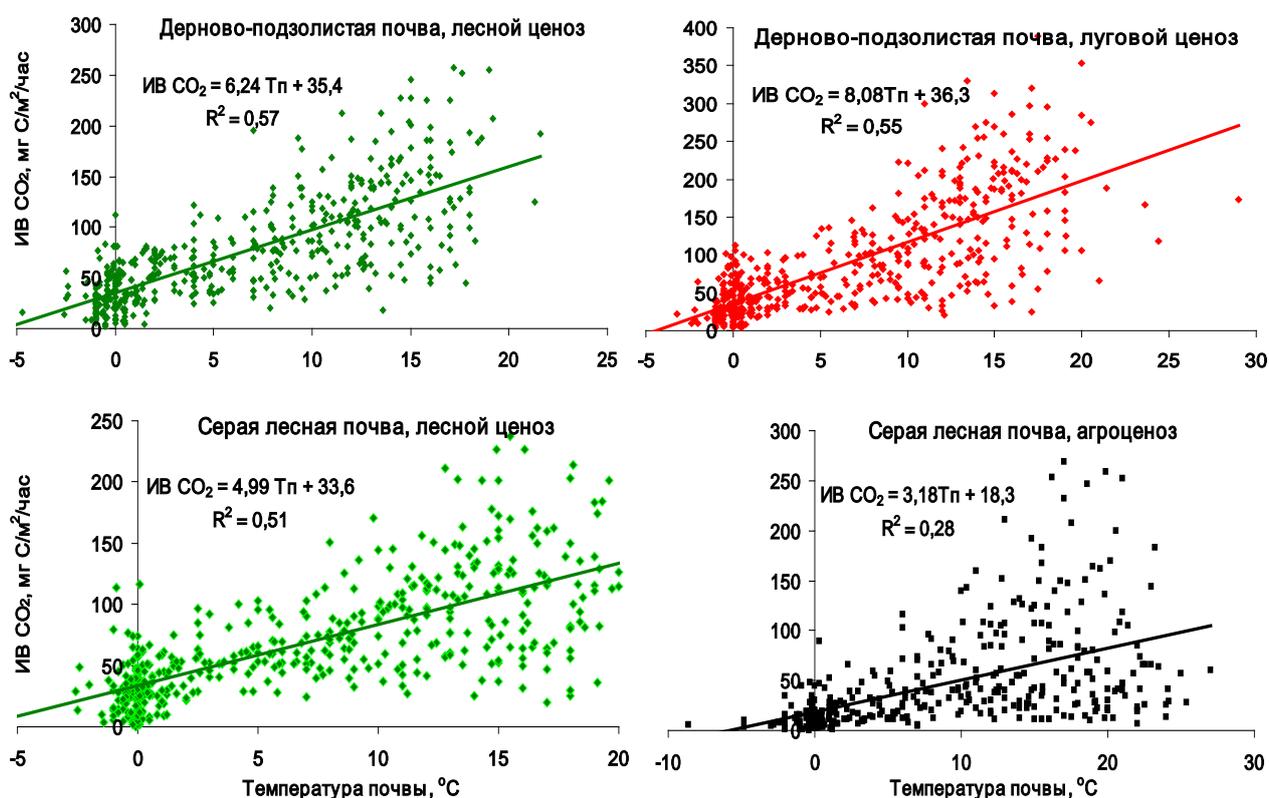


Рис. 5. Взаимосвязь между среднесуточной интенсивностью выделения CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны и среднесуточной температурой почвы за весь период наблюдений.

Базируясь на еженедельных измерениях, были рассчитаны среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые потоки CO_2 из изучаемых почв. Для всех экосистем, на которых велись исследования, был характерен «классический» для умеренной зоны характер изменения месячных потоков CO_2 из почв: с минимальными величинами - в зимний период, и с максимальными - в июле месяце, когда складываются наиболее благоприятные (в среднем) погодные условия для функционирования микробных сообществ и имеет место активный дыхательный процесс корневых систем высших растений (рис. 6.). Именно в этом месяце были зарегистрированы самые высокие среднемноголетние значения суммы осадков и самая высокая температура воздуха.

Полученные данные совершенно отчетливо демонстрируют влияние типа растительности на величину месячных потоков углекислого газа из почв. Так, луговой ценоз на дерново-слабоподзолистой почве с февраля по сентябрь характеризовался более высокими значениями месячных потоков CO_2 из почв, по сравнению с лесными почвами, хотя значимо выше ($\approx 5\%$) эти потоки были только в июне и июле. В этот период, по-видимому, шло активное формирование корневой массы растений в луговом ценозе и вклад корней в общий поток CO_2 из почвы под лугом был максимальным и гораздо выше, чем под лесной растительностью (Ларионова и др., 2003). Кроме того, в этот период, разница почвенных температур под луговой и лесной растительностью достигала максимальных значений - $1.2-1.5^\circ\text{C}$ (Курганова и др., 2007).

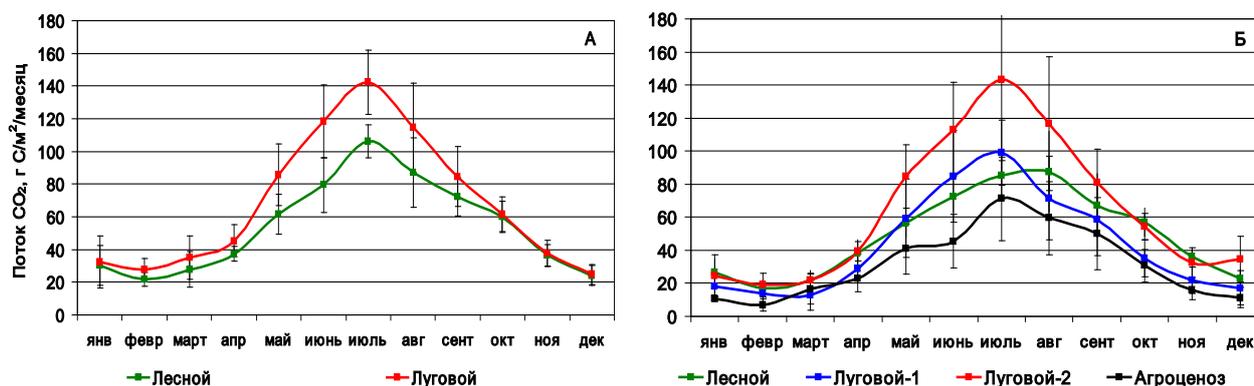


Рис. 6. Средне многолетние месячные потоки CO_2 из дерново-слабоподзолистой (А) и серой лесной (Б) почвами под различными ценозами (вертикальные линии показывают доверительный интервал, при $\alpha = 5\%$).

Аналогичные различия в величинах среднемесячных потоков CO_2 наблюдались на серой лесной почве под лесом и луговым ценозом-2, с той лишь разницей, что из-за более высокой межгодовой вариабельности месячных потоков CO_2 из серых лесных почв обнаруженные отличия между этими ценозами были значимы при $\alpha = 10\%$. Почвы агроценоза на протяжении всего года выделяли самое низкое количество CO_2 .

Коэффициенты межгодовой вариабельности (CV) месячных потоков CO_2 из почв изменялись от 17 до 92%. Самая высокая временная изменчивость была обнаружена для большинства изучаемых экосистем в зимние месяцы и марте ($\text{CV} > 50\%$). В почвах естественных экосистем межгодовая вариабельность месячных потоков CO_2 в пределах теплого периода (апрель-октябрь) была, как правило, ниже, чем в пределах холодного и редко превышала 40%.

Проведенные расчеты показали, что величина *месячных потоков CO_2* из почв изученных экосистем в значительной мере контролировалась среднемесячной температурой почв: коэффициенты детерминации R^2 варьировали от 0.39 до 0.69 (рис. 7). Температурный отклик величины месячных потоков диоксида углерода из почв ослабевал в той же последовательности, что и температурная чувствительность среднесуточных значений ИВ CO_2 : Луговой ценоз (дерново-подзолистая почва) > Лесной ценоз (дерново-подзолистая почва) > Лесной ценоз (серая лесная почва) > Агроценоз (серая лесная почва).

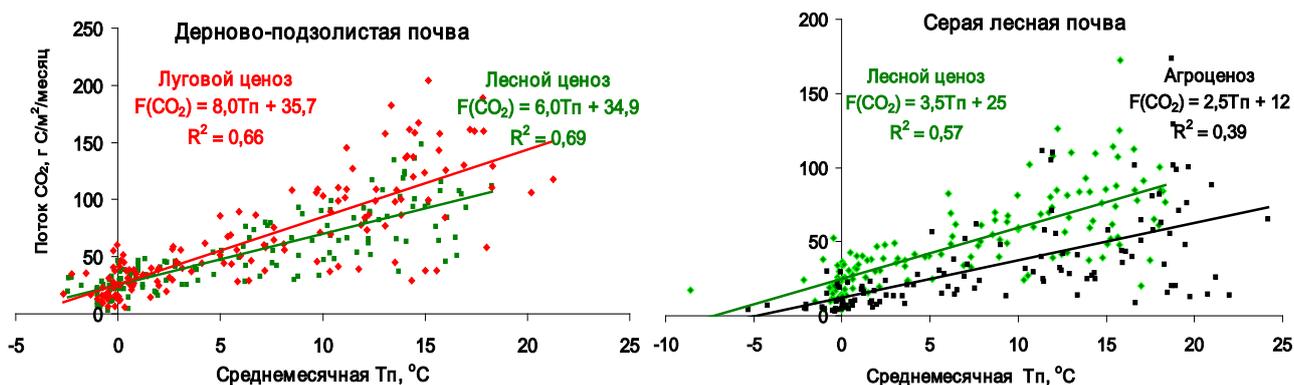


Рис. 7. Взаимосвязь между месячными потоками CO_2 ($F(\text{CO}_2)$, г С/м²/месяц) из почв различных экосистем южно-таежной зоны и среднемесячной температурой почвы за весь период наблюдений.

Сравнивая между собой средне многолетние величины сезонных потоков CO_2 из почв различных экосистем умеренной зоны (рис. 8), можно заключить, что их значения убывали в следующей последовательности: *лето* > *осень* ≥ *весна* > *зима*. При этом средне летние потоки были значительно выше осенних и весенних в почвах всех экосистем, а осенние потоки достоверно превышали весенние только в лесных экосистемах, что, по-видимому, связано с поступлением в осенний период в лесные почвы большей массы свежего растительного опада и его активным разложением (Kurganova et al., 2004; Кудеяров, Курганова, 2005). Зимние потоки CO_2 из почв были невысокими и во всех без исключения экосистемах значительно отличались от весенних, летних и осенних потоков CO_2 (при $\alpha=5\%$). Различия по величине сезонных потоков CO_2 из почв, обусловленные типом почв и видом землепользования, были недостоверны в большинстве случаев из-за их довольно высокой межгодовой вариабельности (рис. 8).

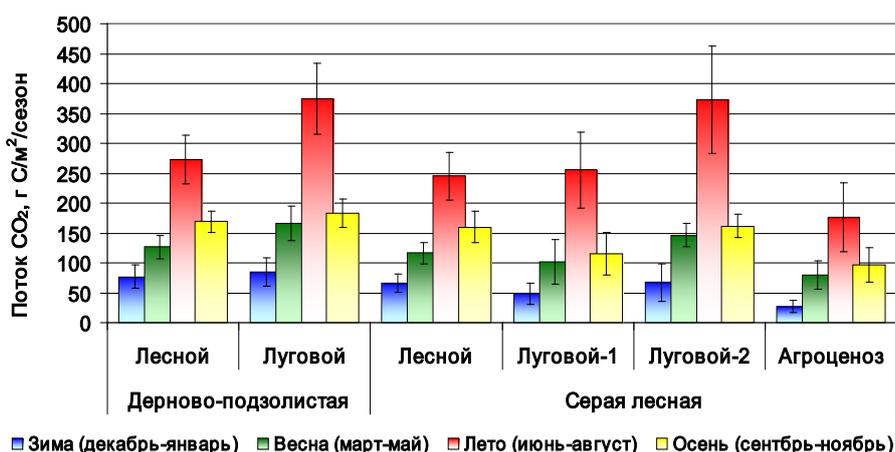


Рис. 8. Средне-многолетние сезонные потоки CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны (вертикальные линии показывают доверительный интервал, при $\alpha = 0,05$).

Сезонные потоки углекислого газа из почв варьировали слабее, чем месячные. Их межгодовая вариабельность зависела от типа экосистемы и составляла: 26-59% - для зимы и лета, 14-49% - для весны и осени. При этом самая высокая межгодовая вариабельность сезонных потоков была характерна для почв агроценоза (48-59%) и лугового ценоза-1 (31-46%), что объясняется большей чувствительностью нарушенных экосистем, по сравнению с естественными, к контрастным сменам погодных условий.

Эмиссия CO_2 из сезонно-промерзающих почв южно-таежной зоны в холодный (снежный) период года (ноябрь-апрель) составляла существенную величину: от 45 до 319 $\text{г}/\text{м}^2$ в зависимости от типа ценоза и погодных условий года исследований, и ее не следует «сбрасывать со счетов», когда перед исследователями стоит цель оценить годовые потоки CO_2 из почв или баланс углерода в экосистеме. На активные процессы трансформации органических материалов в зимнее время года указывается в работе *М.В. Смагиной (1988)*, а согласно расчетам *А.В. Смагина (1991, 2005)*, в почвах лесных БГЦ выделение CO_2 с ноября по март составило 1/3 часть годовых потоков.

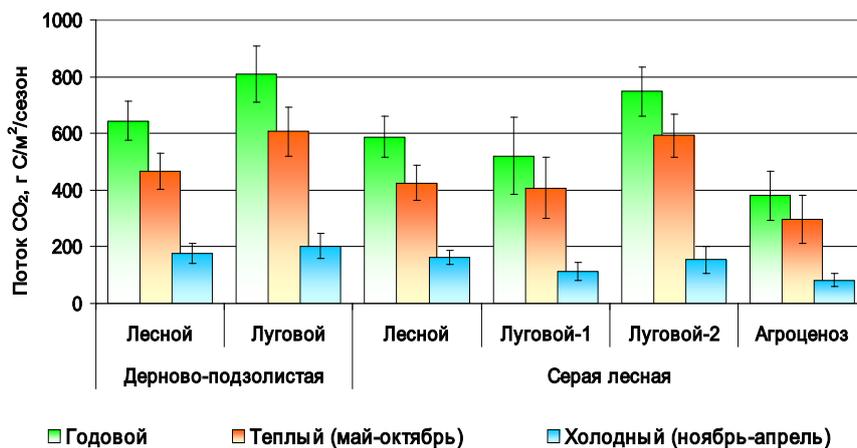


Рис. 9. Среднемноголетние годовые потоки CO_2 из почв различных экосистем умеренной зоны и в течение теплого и холодного периодов (вертикальные линии показывают доверительный интервал, при $\alpha = 0.05$).

Среднемноголетние годовые потоки CO_2 из почв изученных экосистем были максимальными в луговых ценозах: 809 ± 100 $\text{г С}/\text{м}^2/\text{год}$ (дерново-слабоподзолистая почва) и 747 ± 86 $\text{г С}/\text{м}^2/\text{год}$ (серая лесная почва). Они значимо (при $\alpha = 5-10\%$) превышали годовые потоки углекислого газа из почв других экосистем (рис. 9). Минимальная величина среднемноголетней суммарной годовой эмиссии CO_2 была зарегистрирована на пахотных серых лесных почвах (381 ± 78 $\text{г С}/\text{м}^2/\text{год}$). Она была значимо ниже (в 1.5-2 раза, $\alpha = 5\%$), чем в почвах всех остальных ценозов, за исключением лугового ценоза-1. Достоверно не различались между собой суммарные количества CO_2 , выделяющиеся за год с поверхности почв лесных ценозов и лугового ценоза-1 (рис. 9). Полученные нами оценки годовых потоков углекислого газа из почв вполне соответствуют идентичным оценкам, имеющимся в литературе для почв лесных (340-760 $\text{г С}/\text{м}^2/\text{год}$) и луговых (750-814 $\text{г С}/\text{м}^2/\text{год}$) экосистем бореальной и умеренной зон (*Raich and Sholesinger, 1992; Pajary, 1995; Вомперский и др., 2000; Janssens et al., 2001; Maljanen et al., 2001; Frank et al., 2002; Максимов, 2007; Ведрова, 2008*). Согласно нашим расчетам, межгодовая вариабельность суммарных годовых потоков углекислого газа из почв различных экосистем южно-таежной зоны за 11 лет наблюдений в среднем составляла 24% и была самой высокой в луговом ценозе-1 и агроценозе (33-37%). В почвах естественных экосистем межгодовая изменчивость годовых потоков CO_2 из почв была существенно ниже и составляла 13-21%.

Для всего 11-летнего ряда данных и более коротких временных рядов (5, 7, 10 лет) были выявлены тесные положительные связи между годовыми потоками CO_2 из почв изученных экосистем и суммой осадков за весенне-

летний период (коэффициенты детерминации, $R^2=0.73-0.99$; табл. 1). На основе полученных данных были разработаны эмпирические модели, описывающие взаимосвязь между годовыми потоками CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны и количеством осадков за весенне-летний период (Kurganova et al., 2004, 2007; Кудеяров, Курганова, 2005).

Таблица 1. Эмпирические модели, описывающие взаимосвязь между годовыми потоками CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны и количеством осадков за весенне-летний период (10 лет наблюдений).

| Почва | Ценоз | Уравнение регрессии | R^2 | F |
|---------------------|-----------|---------------------|-------|-------|
| Дерново-подзолистая | Лесной | 1.09 P + 245 | 0.74 | 0.001 |
| | Луговой | 1.54 P + 243 | 0.76 | 0.001 |
| Серая лесная | Лесной | 1.11 P + 176 | 0.73 | 0.002 |
| | Луговой-1 | 1.49 P - 17 | 0.90 | 0.004 |
| | Луговой-2 | 1.12 P + 318 | 0.99 | 0.003 |
| | Агроценоз | 1.32 P - 93 | 0.82 | 0.001 |

Т.Х. Максимов (2007), изучающий особенности круговорота углерода в лиственных лесах Якутии, на основе многолетних наблюдений (2001, 2004-2006 гг.) сделал идентичные заключения о влиянии увлажнения на суммарные потоки CO_2 из дерново-таежных почв: выбросы углерода в атмосферу в виде CO_2 в сухие годы были в среднем в 1.5 раза ниже, чем во влажные годы. Однако короткий ряд данных не позволил автору получить статистическое подтверждение этой зависимости.

Достоверных корреляционных связей между годовыми потоками CO_2 из почв южно-таежной зоны и среднегодовой температурой воздуха найдено не было ни для 11-летнего ряда наблюдений, ни для более коротких временных рядов, что вполне согласуется с наблюдениями, проведенными в лесных биогеоценозах Европы (Valentini et al., 2000; Janssens et al., 2001). Таким образом, многолетние непрерывные наблюдения за эмиссией CO_2 из почв различных экосистем позволили заключить, что в южно-таежной зоне основным фактором, определяющим и контролирующим величины годовых потоков CO_2 из почв, являются осадки за весенне-летний период.

На основе полученных данных нами были рассчитаны вклады различных временных промежутков (месяц, сезон, период) в суммарный годовой поток CO_2 из почв, в среднем за весь период исследований (1997-2008 гг.) и за отдельно взятые годы, и была оценена их межгодовая вариабельность. Впервые на анализе большого фактического материала было убедительно продемонстрировано, что доля холодного периода (ноябрь-апрель) в годовом потоке диоксида углерода из почв лесной зоны весьма значительна и в среднем за 11 лет наблюдений составляла 21-28%. В зависимости от сочетания погодных условий в различные временные периоды, охваченные исследованиями, доля холодного периода в годовом потоке CO_2 из почв южно-

таежной зоны варьировала от 11-16% (в 1999-2000 гг. с теплым, влажным летом и холодной зимой) до 38-42% (в 2000-2001, 2006-2008 гг. с жарким летом и довольно теплой зимой). В соответствии с оценками других исследователей, дыхание почв в холодный период года оценивается близкими величинами: больше 10% от годового потока CO_2 в тундровых экосистемах (Oechel et al, 1997; Федоров-Давыдов, 1998; Замолодчиков и др., 2000; Zamolodchikov and Karelin, 2001) и около 20% - в экосистемах бореальной зоны (Pajary, 1995; Alm et al., 1999). Таким образом, недоучет эмиссии CO_2 в холодный период года может привести к существенным искажениям в оценке годовых потоков и баланса углерода в экосистемах южно-таежной зоны.

Проведенные расчеты показали, что для каждой из изученных экосистем долевое участие сезонов заметно варьировало в зависимости от сочетания погодных условий в определенный год исследований. Наименьшая изменчивость величины сезонных вкладов в годовой поток CO_2 из почв была характерна для летнего сезона (7-29%), что позволяет рекомендовать использовать эту величину для расчета годовых потоков углекислого газа из почв. Наибольшая вариабельность долевого участия была характерна для зимнего сезона (34-63%). В почвах естественных экосистем величина вкладов отдельных сезонов в годовой поток была более стабильной, чем в почве агроценоза.

Глава 5. Оценка влияния различных факторов на интенсивность выделения CO_2 из почв (анализ данных полевых и лабораторных экспериментов)

Анализ полученных регрессионных зависимостей между ИВ CO_2 и Тп (данные многолетних полевых наблюдений) показал, что температурная чувствительность дыхательной активности почв (ее характеризует регрессионный коэффициент линейной зависимости, k) в разные годы исследований была различной и в значительной степени зависела от типа ценоза. На примере дерново-подзолистой почвы (табл. 2) было выявлено, что к изменению температуры более чувствительным было дыхание почвы под луговой растительностью, нежели под лесной: значения k на лугу в отдельные годы достигали 10.1-11.7, а за весь период исследований составили 8.90, в то время как в лесу они не превышали 8.77, составляя 6.90 для всего ряда данных. Причина обнаруженных различий кроется, по видимому, в наличии большего количества тонких корней в почве под лугом, дыхание которых дает более заметный отклик на повышение температуры, по сравнению с массой почвы без корней (Boone et al., 1998).

Сходные закономерности были обнаружены нами при сравнении дыхательной активности серой лесной почвы под лесом и агроценозом: регрессионные коэффициенты k для всего периода наблюдений составили соответственно 5.3 и 3.5, соответственно, а в зависимости от года исследований значения k варьировали от 1.5 до 7.8 в лесном ценозе и от 1.4 до 5.9 – в агроценозе, свидетельствуя о том, что температурная чувствительность почв под лесом была выше, чем в агроценозе.

Таблица 2. Эмпирические модели и температурные коэффициенты Q_{10} , отражающие взаимосвязь между интенсивностью дыхания и температурой почвы ($T_{\text{п}}$) за весь период наблюдений (1997-2006 гг.) и в отдельные годы.

| Период наблюдений | Число измерений, n | Коэффициент детерминации, R^2 | Уравнение линейной регрессии | Коэффициент детерминации, R^2 | Q_{10} |
|---|--------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|-------------|
| Дерново-подзолистая почва, лесной ценоз | | | | | |
| 1997/1998 | 47 | 0.82 | $8.77 T_{\text{п}} + 48.8$ | 0.72 | 2.60 |
| 1998/1999 | 48 | 0.76 | $7.39 T_{\text{п}} + 32.9$ | 0.75 | 2.92 |
| 1999/2000 | 45 | 0.76 | $7.67 T_{\text{п}} + 22.9$ | 0.66 | 5.00 |
| 2000/2001 | 34 | 0.57 | $4.95 T_{\text{п}} + 33.2$ | 0.45 | 1.98 |
| 2001/2002 | 47 | 0.60 | $4.78 T_{\text{п}} + 31.2$ | 0.59 | 3.14 |
| 2002/2003 | 43 | 0.60 | $5.59 T_{\text{п}} + 44.1$ | 0.56 | 2.54 |
| 2003/2004 | 46 | 0.75 | $7.28 T_{\text{п}} + 25.9$ | 0.73 | 3.11 |
| 2004/2005 | 38 | 0.78 | $8.3 T_{\text{п}} + 27.4$ | 0.72 | 3.42 |
| 2005/2006 | 44 | 0.72 | $8.4 T_{\text{п}} + 36.8$ | 0.76 | 2.74 |
| 1997 - 2006 | 392 | 0.65 | $6.90 T_{\text{п}} + 33.0$ | 0.58 | 2.92 |
| Дерново-подзолистая почва, луговой ценоз | | | | | |
| 1997/1998 | 46 | 0.83 | $10.6 T_{\text{п}} + 39.4$ | 0.63 | 2.53 |
| 1998/1999 | 47 | 0.74 | $9.65 T_{\text{п}} + 24.2$ | 0.73 | 2.81 |
| 1999/2000 | 45 | 0.75 | $10.1 T_{\text{п}} + 48.6$ | 0.73 | 5.43 |
| 2000/2001 | 32 | 0.40 | $5.21 T_{\text{п}} + 27.5$ | 0.34 | 1.90 |
| 2001/2002 | 47 | 0.46 | $4.69 T_{\text{п}} + 36.9$ | 0.47 | 2.18 |
| 2002/2003 | 43 | 0.83 | $7.70 T_{\text{п}} + 25.0$ | 0.82 | 2.94 |
| 2003/2004 | 45 | 0.54 | $9.29 T_{\text{п}} + 25.4$ | 0.6 | 3.37 |
| 2004/2005 | 39 | 0.61 | $11.3 T_{\text{п}} + 22.2$ | 0.61 | 3.14 |
| 2005/2006 | 44 | 0.61 | $11.7 T_{\text{п}} + 31.5$ | 0.83 | 3.48 |
| 1997 - 2006 | 390 | 0.62 | $8.90 T_{\text{п}} + 35.7$ | 0.59 | 2.98 |
| Серая лесная почва, лесной ценоз | | | | | |
| 1997/1998 | 48 | 0.82 | $7.1 T_{\text{п}} + 43.6$ | 0.77 | 2.41 |
| 1998/1999 | 46 | 0.74 | $6.0 T_{\text{п}} + 28.4$ | 0.70 | 2.87 |
| 1999/2000 | 45 | 0.79 | $7.8 T_{\text{п}} + 15.5$ | 0.71 | 6.20 |
| 2000/2001 | 37 | 0.58 | $4.4 T_{\text{п}} + 30.7$ | 0.56 | 2.22 |
| 2001/2002 | 45 | 0.27 | $1.5 T_{\text{п}} + 24.7$ | 0.34 | 1.72 |
| 2002/2003 | 39 | 0.73 | $4.3 T_{\text{п}} + 38.9$ | 0.61 | 2.31 |
| 2003/2004 | 41 | 0.54 | $5.4 T_{\text{п}} + 29.7$ | 0.56 | 2.28 |
| 2004/2005 | 36 | 0.48 | $4.9 T_{\text{п}} + 32.6$ | 0.56 | 2.57 |
| 2005/2006 | 39 | 0.60 | $7.2 T_{\text{п}} + 35.1$ | 0.60 | 2.47 |
| 1997 - 2006 | 376 | 0.53 | $5.3 T_{\text{п}} + 31.6$ | 0.51 | 2.58 |
| Серая лесная почва, агроценоз | | | | | |
| 1997/1998 | 31 | 0.32 | $4.8 T_{\text{п}} + 38.6$ | 0.43 | 2.73 |
| 1998/1999 | 28 | ns | $1.1 T_{\text{п}} + 34.6$ | ns | 1.40 |
| 1999/2000 | 43 | 0.51 | $5.0 T_{\text{п}} + 12.2$ | 0.69 | 4.22 |
| 2000/2001 | 36 | 0.45 | $3.0 T_{\text{п}} + 12.3$ | 0.55 | 2.46 |
| 2001/2002 | 32 | ns | $0.2 T_{\text{п}} + 20.3$ | ns | 1.18 |
| 2002/2003 | 38 | 0.57 | $4.1 T_{\text{п}} + 18.1$ | 0.72 | 4.35 |
| 2003/2004 | 42 | 0.17 | $1.4 T_{\text{п}} + 17.0$ | 0.27 | 1.85 |
| 2004/2005 | 37 | 0.48 | $3.6 T_{\text{п}} + 19.1$ | 0.47 | 2.26 |
| 2005/2006 | 28 | 0.27 | $5.9 T_{\text{п}} + 22.9$ | 0.30 | 1.87 |
| 1997 - 2006 | 286 | 0.29 | $3.5 T_{\text{п}} + 18.4$ | 0.44 | 2.62 |

Величина температурного коэффициента Q_{10} (экспоненциальная модель) также заметно варьировала в зависимости от года и сезона исследований. В дерново-подзолистой почве значения Q_{10} , рассчитанные для отдельных лет, изменялись от 1.06 до 5.43 в луговом ценозе и от 1.95 до 6.42 в лесном ценозе, в то время как за весь девятилетний период измерений они составили в этих экосистемах очень близкие величины: 2.92 и 2.98, соответственно (табл. 2). Выявлен отчетливый тренд уменьшения значений температурного коэффициента с увеличением среднелетней температуры воздуха. Для серой лесной почвы значения температурных коэффициентов в зависимости от года исследований также заметно варьировали, а за весь период наблюдений были чуть ниже, чем в дерново-слабоподзолистой почве: 2.58 и 2.62 - для лесного и лугового ценозов, соответственно.

Согласно нашим оценкам, межгодовая вариабельность значений Q_{10} для дыхания почв в различных экосистемах южно-таежной зоны составила 27-47%. Расчеты, проведенные для отдельных календарных сезонов (табл. 3), показали, что в теплый период года значения Q_{10} были минимальны (1.57-2.00), а в холодный - максимальны (4.51-6.46).

Таблица 3. Температурные коэффициенты Q_{10} для дыхания почв умеренной зоны в различные сезоны наблюдений.

| Почва, ценоз | Период наблюдений | | | | | | |
|---|----------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | Холодный | Теплый | Зима | Весна | Лето | Осень | |
| Дерново-подзолистая, лесной ценоз | Q_{10} | 4.51 | 2.00 | 2.96 | 3.40 | 1.69 | 2.59 |
| | n | 191 | 201 | 91 | 102 | 100 | 99 |
| | R^2 | 0.18 | 0.31 | ns | 0.34 | 0.11 | 0.51 |
| Дерново-подзолистая, луговой ценоз | Q_{10} | 5.20 | 1.90 | 5.67 | 3.37 | 1.13 | 3.17 |
| | n | 191 | 199 | 90 | 103 | 99 | 98 |
| | R^2 | 0.25 | 0.25 | ns | 0.44 | ns | 0.49 |
| Серая лесная, лесной ценоз | Q_{10} | 5.45 | 1.57 | 12.42 | 3.18 | 0.98 | 2.07 |
| | n | 178 | 197 | 88 | 93 | 95 | 99 |
| | R^2 | 0.24 | 0.14 | 0.14 | 0.33 | ns | 0.35 |
| Серая лесная, агроценоз | Q_{10} | 6.46 | 1.43 | 6.25 | 3.27 | 1.07 | 3.13 |
| | n | 113 | 173 | 49 | 67 | 81 | 89 |
| | R^2 | 0.38 | ns | ns | 0.48 | ns | 0.35 |

Полученные данные позволяют предположить, что ожидаемые изменения климата, выражающиеся в повышении температуры воздуха и почв, будут иметь неодинаковые последствия в различных климатических зонах. Так например, повышение температуры почв в тундровой зоне может привести к гораздо более заметному усилению их дыхательной активности по сравнению с почвами умеренного климата.

Для еще более детальной оценки влияния температуры и влажности почв на ИВ CO₂, среднесуточные значения потоков диоксида углерода были разбиты на классы по температуре (6 классов, шаг 5°C) и влажности, выраженной в % от ППВ (5 классов, шаг 20%). Значения температурных коэффициентов Q_{10} для ИВ CO₂ рассчитывались дифференцировано с учетом средних значений в этих интервалах (табл. 4). Полученные величины Q_{10} для дыхательной активности дерново-подзолистой почвы варьировали от 0.72 до 7.64 в луговом ценозе, и менялись в более узких пределах – от 1.01 до 4.87 - в лесном ценозе. Как правило, значения температурного коэффициента в сходных интервалах температур повышались с увеличением влажности, а при одинаковой влажности значения Q_{10} уменьшались с ростом температуры. Обнаруженная тенденция была более строгой при интервальной оценке с шагом 10°C и имела больше исключений при более узком (5°C) ранжировании данных (табл. 4).

Таблица 4. Значения температурного коэффициента Q_{10} для эмиссии CO₂ в различных температурно-влажностных интервалах.

| Градации по влажности, % ППВ | Классы температур, °C | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | < 0 | 0.1 - 5 | 5.1 - 10 | 10.1 - 15 | 15.1 - 20 | <0 - 10 | 5.1 - 15 | 10.1 - 20 | 15.1 - 25 |
| Дерново-слабоподзолистая почва, Луговой ценоз | | | | | | | | | |
| < 30 | 3.42 | 1.29 | 1.50 | 1.18 | | 2.10 | 1.39 | 1.33 | |
| 30 - 50 | 1.65 | 4.60 | 2.05 | 2.20 | | 2.75 | 3.07 | 2.12 | |
| 50 - 70 | 3.62 | 4.35 | 2.33 | 0.90 | | 3.97 | 3.19 | 1.45 | |
| 70 - 90 | 4.58 | 7.64 | 2.44 | | | 5.91 | 4.32 | | |
| > 90 | | | | | | 4.27 | | | |
| Весь интервал | 2.72 | 4.62 | 1.72 | 1.69 | 0.72 | 3.55 | 2.82 | 1.71 | 1.11 |
| Дерново-слабоподзолистая почва, Лесной ценоз | | | | | | | | | |
| < 30 | | | | 1.43 | | | | | |
| 30 - 50 | 3.42 | 2.42 | 2.32 | 1.82 | | 2.87 | 2.37 | 2.06 | |
| 50 - 70 | 1.76 | 2.26 | 2.23 | 1.01 | | 2.00 | 2.25 | 1.50 | |
| 70 - 90 | 3.03 | 2.40 | 3.16 | 1.24 | | 2.70 | 2.75 | 1.98 | |
| > 90 | 2.58 | 4.87 | 1.94 | 1.83 | | 3.54 | 3.07 | 1.88 | |
| Весь интервал | 2.61 | 3.21 | 2.15 | 1.37 | | 2.89 | 2.63 | 1.72 | |

Проведенные расчеты позволяют заключить, что использование температурных коэффициентов теплого периода для расчета ИВ CO₂ в холодное время года (а это наиболее распространенный прием, используемый исследователями для оценки зимней эмиссии), по всей вероятности приведет, к заметному завышению (в 2-4 раза) потоков CO₂ из почв в холодный период года и искажению реальных величин годовой эмиссии углекислого газа. И хотя, экспоненциальные модели с последующей оценкой температурного коэффициента Q_{10} являются в настоящее время наиболее популярными среди

исследователей, их применение нельзя признать абсолютно правомерным для описания такого сложного процесса как дыхание почв. Необходимы поиск и разработка более адекватных функциональных зависимостей, связывающих скорость выделения CO_2 из почв и ее гидротермические характеристики.

Изменения климата, наблюдаемые в настоящее время, вызывают не только общее повышение температуры воздуха (как в глобальном, так и в региональном масштабах), но и являются причиной более частых циклов замерзания и оттаивания почв в умеренной и бореальной зонах вследствие уменьшения толщины снежного покрова (Austnes et al., 2007), а также более частых циклов увлажнения-высушивания почв летом, как следствие участвовавших весенне-летних засух (Золотокрылин и др., 2007). Исследования последних десятилетий показали, что вышеупомянутые процессы вызывают резкое усиление эмиссии CO_2 (Christensen and Tiedje, 1990; Burton and Beauchamp, 1994; Brumme et al., 1999; Teepe et al., 2000, 2001) и поэтому идентифицируются как существенный источник углекислого газа в атмосфере (Flessa et al., 1995; Matzner and Borken, 2008).

Лабораторные эксперименты по влиянию **процессов замораживания-оттаивания почв на ИВ CO_2** , проведенные в рамках настоящего исследования, показали, что дыхательная активность полностью замороженных почв была невысокой (0.8-4.5 мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{час}$) и составляла 5-20% от величины потока CO_2 при 10°C (рис. 10). Микробиологическая активность почв при значительно более низких температурах (-16 и -39°C) была выявлена в работах Н.С. Паникова с соавт. (Паников, Дедыш, 2000; Panikov et al., 2006) и зафиксирована при полевых наблюдениях (Zimov et al., 1993, 1996; Oechel et al., 1997; Winston et al., 1997; Замолодчиков и др., 2000; Карелин, 2006).

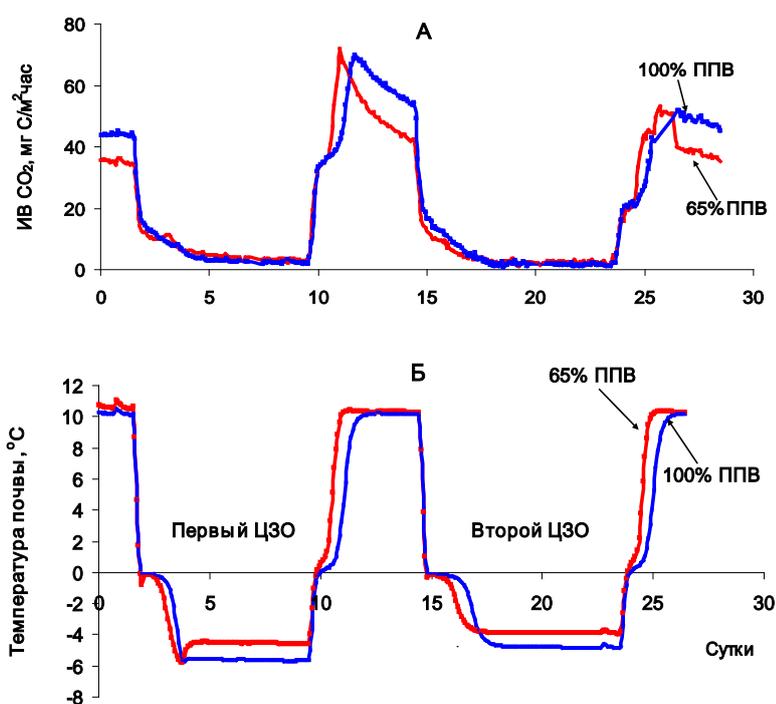


Рис. 10. Изменение интенсивности выделения CO_2 (А) и температуры буроземной почвы под лесным ценозом (Б) при разных уровнях увлажнения во время чередующихся циклов замораживания и оттаивания.

Было найдено, что замораживание и последующее оттаивание почв инициирует значительный по величине, но непродолжительный по времени

всплеск эмиссии CO₂ (рис. 10). Он вызван как увеличением температуры почв во время оттаивания и физическим высвобождением зажатого в порах CO₂, так и активным потреблением микроорганизмами дополнительного количества легкодоступного органического материала, представленного клетками микробного сообщества, погибшими в результате воздействия отрицательных температур. Преимущественно биологическая природа этих всплесков была подтверждена нами в специальных экспериментах, проведенных на стерильных почвах (Lopes de Gerenyu и др., 2005; Lopes de Gerenyu et al., 2007).

Усиление дыхательной активности почв, вызванное процессами замерзания-оттаивания, в значительной степени зависело от особенностей землепользования и порядкового номера цикла замерзания-оттаивания (ЦЗО). Так, после первого ЦЗО эмиссия CO₂ почвами составляла в среднем 35-70% от их начальной величины (при +10°C) и была существенно выше, чем после второго цикла - 19-58% от ИВ CO₂ при +10°C. Это обстоятельство связано с тем, что после второго ЦЗО поток CO₂, обусловленный разложением погибшей микробной биомассы, был значительно ниже, чем после первого акта замерзания-оттаивания. Дополнительные (экстра) потоки CO₂, вызванные процессами промерзания и последующего оттаивания почв, составляли 7-23% от общего количества CO₂, выделившегося в течение всего эксперимента (табл. 5). В лесных почвах экстра-потоки CO₂, после первого ЦЗО были в 2-3 раза выше, чем после второго цикла. В пахотных почвах эта разница не являлась значимой (Курганова, Tune, 2003; Kurganova et al., 2007).

Таблица 5. Суммарные и экстра CO₂-потоки (г С /м²/период) из изучаемых почв во время циклов замерзания оттаивания

| Цикл | Поток CO ₂ | Варианты опыта | | | |
|-----------------|---|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| | | Лесная 60% ППВ | Лесная 100% ППВ | Пахотная 60% ППВ | Пахотная 100% ППВ |
| 1-й цикл | <i>Экстра-поток</i> (после оттаивания) | 1.37 | 0.81 | 0.70 | 0.25 |
| | Суммарный поток | 7.00 | 7.34 | 2.73 | 1.47 |
| | <i>Экстра поток / Суммарный поток, %</i> | 19.6 | 11.1 | 25.5 | 17.2 |
| 2-й цикл | <i>Экстра-поток:</i> до 2-го замораживания | 0.23 | 0.32 | 0.14 | 0.08 |
| | после оттаивания | 0.56 | -0.10 | 0.41 | 0.13 |
| | <i>общий</i> | 0.79 | 0.22 | 0.56 | 0.21 |
| | Суммарный поток | 6.46 | 7.04 | 2.84 | 1.77 |
| | <i>Экстра поток / Суммарный поток, %</i> | 12.3 | 3.1 | 19.6 | 11.7 |
| 1-й и 2-й циклы | <i>Общий экстра-поток</i> | 2.17 | 1.03 | 1.25 | 0.46 |
| | Суммарный поток | 13.5 | 14.4 | 5.56 | 3.24 |
| | <i>Экстра поток / Суммарный поток, %</i> | 16.1 | 7.2 | 22.5 | 14.2 |

Обнаружено, что суммарные и дополнительные потоки CO_2 за два цикла промерзания-оттаивания положительно коррелировали с общей порозностью, соотношением C/N, содержанием общего азота и углерода. Значения температурных коэффициентов Q_{10} , характеризующих усиление эмиссии CO_2 в процессе оттаивания почв, в зависимости от влажности почвы и типа землепользования составляли 4.7-6.9 (Kurganova, Teepe, 2003). Таким образом, проведенные эксперименты показали, что часто повторяющиеся циклы промерзания-оттаивания могут внести значительные коррективы в величины сезонных и годовых потоков CO_2 из сезонно-промерзающих почв бореальной и умеренной зон.

Изучение влияния **процессов увлажнения-высушивания** на скорость выделения CO_2 из почв проводили путем анализа данных полевых мониторинговых наблюдений в летние сезоны 2001, 2002 и 2007 гг., когда продолжительные (несколько недель) весенние или летние засухи чередовались с периодами нормального или повышенного увлажнения. Объекты и методика этих динамических наблюдений изложены в главе 2. В 2002 и 2007 гг. сумма осадков в течение лета была меньше среднемноголетних значений в 1.8 и 2.2 раза соответственно, а интенсивность дыхания почв в луговых и лесных ценозах во время сухих периодов не превышала 67-84 мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{час}$, что сравнимо со значениями зимних потоков CO_2 из почв. В агроценозе депрессивное влияние засухи было выражено еще сильнее: средняя интенсивность дыхания почв здесь составляла всего 15-22 мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{час}$. Увлажнение почв после длительных периодов иссушения приводило к значительному (в 1.5-3 раза) усилению их дыхательной активности (Ларионова и др., 2010). Поскольку во время позднелетних засух наступление влажного сезона обычно сопровождалось существенным снижением температуры почвы (на 5-10 $^{\circ}\text{C}$), то действительное повышение интенсивности почвенного дыхания, вызванное увлажнением почв после их иссушения, было, по-видимому, еще более значительным. Продолжительные летние засухи 2002 и 2007 гг. обусловили и весьма низкую суммарную эмиссию CO_2 из почв за летний период, которая в лесных и луговых ценозах была ниже среднемноголетних значений в 1.5-2.5 раза, а в серой лесной почве под агроценозом – в 3.8-4.6 раза (рис. 11). Доля летнего сезона в засушливые годы составляла всего 25-30% от годового потока CO_2 из почв при среднем многолетнем 41-49%.

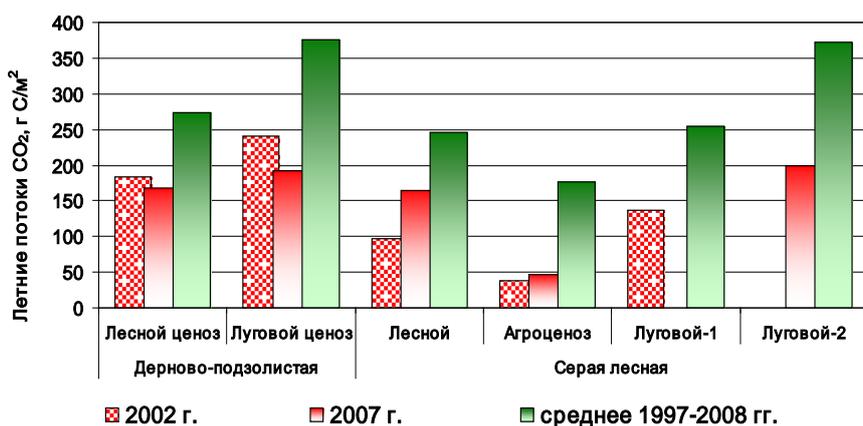


Рис. 11. Сравнение летних потоков CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны в засушливые годы со среднемноголетними значениями суммарной летней эмиссии CO_2 из почв.

Проведенный анализ позволяет заключить, что весенние и летние засухи значительно снижают суммарные летние потоки CO_2 из почв, несмотря на значительное усиление дыхательной активности почв, индуцированное ее увлажнением после значительного иссушения. Можно предположить, что изменения климата, наблюдаемые в настоящее время и выражающиеся в общем потеплении зимних периодов, более частых засухах и неоднократно повторяющихся периодах промерзания-оттаивания почв, незначительно изменят общую величину годовых потоков CO_2 из почв, но приведут в конечном итоге к относительному перераспределению долевого участия отдельных сезонов в суммарной годовой эмиссии углекислого газа из почв, а именно: увеличению вклада зимних потоков CO_2 и уменьшению доли летнего периода.

Не менее важным экологическим фактором, оказывающим огромное влияние на интенсивность дыхания почв, наряду с температурой и влажностью, является *тип растительности*. Анализ данных многолетних полевых наблюдений за эмиссией CO_2 из дерново-слабоподзолистой и серой лесной почв показал, что вид ценоза значимо влиял на величину потоков CO_2 из почв одного типа. Вариабельность суммарной годовой эмиссии углекислого газа из серой лесной почвы, обусловленная типом растительности, в различные годы изменялась от 17 до 52%, при средней величине - 28%. На дерново-слабоподзолистой почве, среднемноголетняя вариабельность потоков, обусловленная типом ценоза, была заметно ниже - 16%. Различия между ценозами более отчетливо проявлялись в летний (теплый) период и были более сглажены в холодное (зимнее) время года. В то же время, в условиях южно-таежной зоны тип почвы оказывал незначительное влияние на величину годовых потоков CO_2 : вариабельность, обусловленная этим фактором, в среднем за весь период исследований составляла 6-7%, свидетельствуя о том, что величина эмиссионных потерь CO_2 в южно-таежной зоне определяется в первую очередь типом ценоза.

Данные **модельного эксперимента 2** по изучению влияния типа растительности на скорость выделения CO_2 из почв зонального ряда при различных температурно-влажностных условиях показали, что ИВ CO_2 из почв при 25°C (начальная скорость) широко варьировала (от 0.01-0.02 до 4-5 мкг С/г/час) в зависимости от типа почвы, вида ценоза и уровня увлажнения (рис. 12).

В почвах степной зоны (черноземы, лугово-каштановые почвы и солонцы) выделение CO_2 было максимальным во всем диапазоне температур при уровне влажности, соответствующем 90% ППВ, а минимальным - при 30% от ППВ уровне увлажнения. В почвах лесной зоны ИВ CO_2 также была минимальной при увлажнении почв, соответствующем 30% ППВ, а различия между увлажнениями 60 и 90% ППВ не были достоверно значимыми.

В пределах одного типа почв при всех уровнях влажности пахотные варианты изучаемых почв характеризовались значимо более низкими величинами ИВ CO_2 по сравнению с их естественными аналогами ($\alpha=0.1\%$). По абсолютной величине эти различия были самыми слабыми при низких температурах (0 и 5°C) и достигали максимальных величин при 25°C. Так, в черноземах типичных дыхание пахотных почв было в 1.5-2.5 раза меньше, чем целинных: в серых лесных почвах и солонцах в 2.5-4.7 раза, а в лугово-

каштановых почвах - в 6-8 раз. Найдены тесные позитивные связи ИВ CO₂ из почв с содержанием C_{орг}, общего и минерального азота. Эти связи были более тесными и проявлялись в интервале температур от 10°C до 25°C при увлажнении 60 и 90% ППВ (R=0.64-0.84, F<0.01). При влажности, соответствующей 30% ППВ, связь между этими показателями была менее выражена (R=0.52-0.61, F<0.01) и проявлялась лишь при температуре 25°C. Таким образом, недостаточное увлажнение заметно лимитировало процессы деструкции ОВ почв.

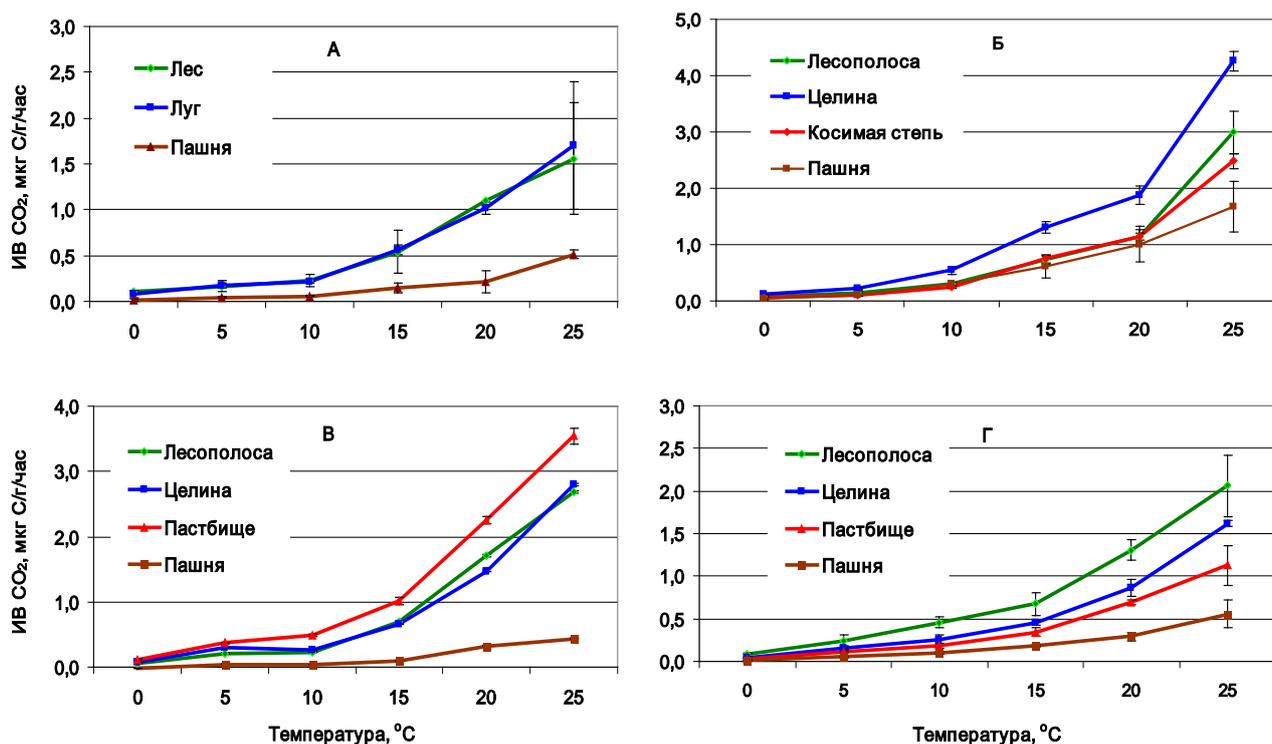


Рис. 12. Интенсивность выделения CO₂ из почв различного землепользования при различных температурах и влажности, соответствующей 60% ППВ: А – серые лесные почвы (Московская обл.); Б – чернозем типичный (Курская обл.); В – лугово-каштановая почва (Уральская обл.); Г – солонец солончаковый (Уральская обл.). Вертикальные линии обозначают доверительный интервал при $\alpha=0.1\%$.

Зависимость ИВ CO₂ из почв от температуры (Т) носила экспоненциальный характер и хорошо аппроксимировалась уравнением регрессии 1-го порядка:

$$\ln \text{ИВ CO}_2 = aT + b \quad (R^2=0.86-0.99, F<0.01).$$

Температурные коэффициенты Q₁₀, варьировали от 1.0 до 7.1 в зависимости от типа почвы, ценоза, уровня влажности и температурного интервала, в пределах которого они вычислялись (Lopes de Gerenyu и др., 2004; Lopes de Gerenyu et al., 2004).

Наши расчеты показали, что вариабельность дыхательной активности основных типов почв зонального ряда, обусловленная типом ценоза, была минимальной в черноземах типичных и, в зависимости от температуры, составляла 31-39%. Для других типов почв она была значительно выше и изменялась от 48 до 72%. Влияние типовой принадлежности почв, оцененное

для ценозов одного вида, наиболее сильно проявлялось в агроценозах. Для них коэффициент вариабельности составил в среднем 78%. Минимальное влияние (24%) тип почвы оказывал их ДА в лесных ценозах. Таким образом, проведенный эксперимент показал, что тип растительности оказывает значительное влияние на скорость выделения CO_2 из почв и его необходимо учитывать, когда речь идет о средних значениях ИВ CO_2 из отдельных типов почв.

Глава 6. Оценка общего, микробного и корневого дыхания почв в наземных экосистемах России

Для того чтобы на основании данных о летних потоках CO_2 из почв всех экосистем, представленных в созданной нами БД «Дыхание почв России», рассчитать годовые потоки диоксида углерода, была собрана сопряженная база данных, включающая результаты круглогодичных измерений потоков CO_2 из почв 19 различных экосистем Евразийского континента. Используя эти данные, была рассчитана доля летнего сезона в годовом потоке CO_2 из почв (C_s) и найдено, что ее величина имеет тесную обратную связь со среднегодовой температурой воздуха и адекватно описывается линейной и полиномиальной функциями: $R^2 = 0.91-0.95$ ($F < 0.001$; рис. 13).

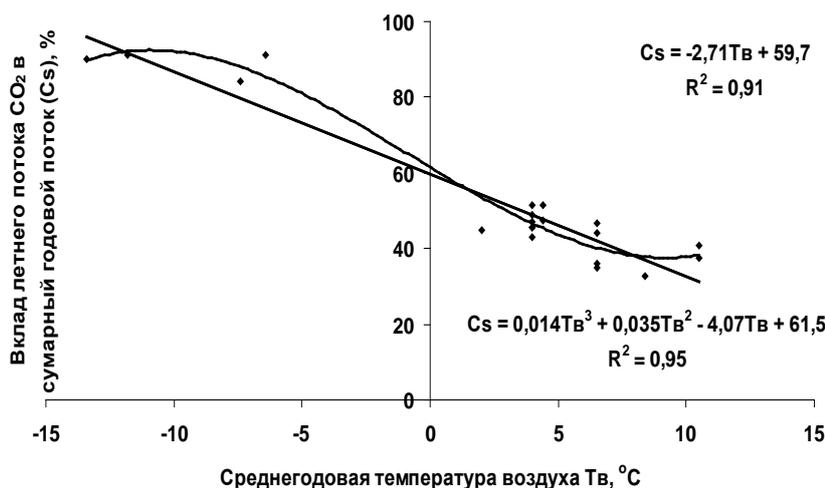


Рис. 13. Взаимосвязь между величиной вклада летнего потока CO_2 в суммарный годовой поток (C_s) и среднегодовой температурой воздуха (T_v).

На основе экспериментальных данных, характеризующих летние потоки CO_2 из почв различных регионов (БД «Дыхание почв России») и разработанной эмпирической модели* были рассчитаны величины вклада летнего потока CO_2 в суммарный годовой поток для почв всех 415 экосистем, представленных в БД. Суммарные годовые потоки диоксида углерода из почв (AF) оценивались согласно следующему уравнению:

$$AF = F_s \cdot 100 / C_s \quad (4),$$

где: AF – годовой поток CO_2 из почв отдельных экосистем ($\text{г С/м}^2/\text{год}$); F_s – поток CO_2 из почвы за летний период (июнь-август, $\text{г С/м}^2/\text{лето}$); C_s – величина вклада летнего потока CO_2 в суммарный годовой поток (%).

* В наших дальнейших расчетах мы использовали полиномиальную модель, как наиболее точно описывающую обнаруженную закономерность.

Годовые потоки CO₂ из почв Российской Федерации, рассчитанные с использованием описанного выше алгоритма, изменялись в очень широких пределах: от 4 г С/м²/год в рекультивированных тундровых почвах до 1933 г С/м²/год - в черноземах мицелиарно-карбонатных (Ставропольский край) и зависели от типа почв и категории землепользования. Среднее и медианное значения суммарной годовой эмиссии CO₂ из почв Российской Федерации составили 448 и 385 г С/м²/год, соответственно.

В рамках диссертационного исследования была разработана иная методология оценки почвенного дыхания, основное отличие которой состояло в применении дифференцированного подхода, включающего учет природно-климатических зон и категорий землепользования при подсчете общего, корневого и микробного дыхания почвенных разностей. Новый методологический подход стал возможен на основе применения геоинформационного анализа, позволяющего наложить друг на друга Почвенную карту РСФСР, 1:2.5 млн. (Фридланд, 1988), Карту категорий земель СССР 1:4 млн. (Январева, 1989) и Карту растительности СССР, 1:4 млн. (Исаченко, 1990), и рассчитать: (1) площади почв, относящихся к четырем категориям землепользования (леса, луга+пастбища, сельскохозяйственные угодья, заболоченные земли), для каждой из шести основных биоклиматических зонах (полярные пустыни, тундра, северная, средняя и южная тайга, леса умеренного пояса, степи, полупустыни); (2) средневзвешенные значения общего и микробного дыхания почв, с учетом доли различных категорий земель в пределах одного почвенного типа, находящегося в разных биоклиматических зонах.

Для расчета средневзвешенных значений общего и микробного дыхания почв было использовано следующее уравнение:

$$AF_i^w = fAF_i \cdot Pf + gAF_i \cdot Pg + cAF_i \cdot Pc + wAF_i \cdot Pw \quad (5),$$

где: AF_i^w - средневзвешенное значение годового потока CO₂ (AF) для индивидуального почвенного типа; fAF_i , gAF_i , cAF_i и wAF_i – значения AF из индивидуальных почвенных типов соответственно под лесной, луговой, сельскохозяйственной растительностью и на заболоченных землях; Pf , Pg , Pc и Pw – доли вышеперечисленных категорий земель в пределах одного почвенного типа.

С целью дифференцированной оценки вклада микробного дыхания в общий поток CO₂ из почв были собраны все доступные литературные данные, сообщающие о долевом участии корневого дыхания в общем дыхании почв (Kurganova, 2003). Имеющиеся данные были объединены в пять различных групп и соответствовали следующим категориям земель: тундра, леса северной и южной тайги, луга и агроценозы. После процедуры выбраковки данных (были оставлены значения, ограниченные квантилями $x_{0.10}$ и $x_{0.90}$), мы рассчитали некоторые статистические параметры, характеризующие долю корневого дыхания в общем потоке CO₂ из почв, принадлежащим к пяти различным категориям земель (табл. 6).

Таблица 6. Доля корневого дыхания ($C_{\text{КД}}$) в общем потоке CO_2 из почв, относящихся к различным категориям земель

| Категория земель | Число исследований | Доля корневого дыхания, % | | | |
|------------------|--------------------|---------------------------|-----------|---------|----------|
| | | Средняя | Медиана | Минимум | Максимум |
| Тундра | 5 | 63 | 70 | 33 | 90 |
| Северная тайга | 6 | 72 | 80 | 43 | 90 |
| Южная тайга | 60 | 48 | 49 | 20 | 90 |
| Луга | 16 | 45 | 40 | 25 | 80 |
| Агроценозы | 10 | 38 | 34 | 16 | 75 |

Расчет микробного и корневого дыхания различных типов почв с учетом вышеупомянутых категорий земель, производили согласно следующим уравнениям:

$$AF_{\text{КД}} = AF \cdot C_{\text{КД}}/100 \quad (6)$$

$$AF_{\text{МД}} = AF \cdot C_{\text{МД}}/100 \quad (7),$$

где: $AF_{\text{КД}}$ и $AF_{\text{МД}}$ – корневое и микробное дыхание в отдельных типах почв; AF - общий поток CO_2 из той же почвы, ($\text{г С/м}^2/\text{год}$; рассчитан согласно полиномиальной модели); $C_{\text{КД}}$ и $C_{\text{МД}} = 100 - C_{\text{КД}}$ – медианные значения доли корневого и микробного дыхания в общем потоке CO_2 из почв, %.

На основе наших расчетов были получены средневзвешенные значения общего, микробного и корневого дыхания из 54 типов почв (*Kurganova, 2003*). Для остальных 82 почвенных типов, содержащихся в легенде почвенной карты (*Фридланд, 1988*), экспериментальные данные отсутствовали. Они были получены нами путем аппроксимации имеющихся значений для других почвенных типов с учетом общности генезиса, гидротермического режима и территориальной близости этих почв.

Общее дыхание почв и его основные компоненты на территории Российской Федерации рассчитывались на основе средневзвешенных значений этих показателей для каждого типа почв и соответствующих площадей. Было найдено, что общее, микробное и корневое дыхание в почвах Российской Федерации составляет соответственно 5.67, 2.78 и 2.89 Гт С/год. Другими словами, приблизительно половина общего потока CO_2 из почв наземных экосистем России образуется за счет микробного дыхания почв (*Kurganova, 2003; Кудяров, Курганова, 2005*).

На основе Почвенной карты РСФСР и полученных значений общего, корневого и микробного потоков CO_2 из отдельных почвенных типов, составляющих легенду этой карты, была создана серия карт «Дыхание почв России» (рис. 14-16; *Kurganova, 2003*) и рассчитаны средневзвешенные общие и микробные потоки CO_2 из почв различных категорий землепользования в различных биоклиматических зонах (таблицы 7, 8). Анализ полученных данных позволил заключить, что самая высокая интенсивность микробного дыхания

характерна для лугов умеренного пояса (308 г С/м²/год), сельскохозяйственных угодий и лесов степной зоны (соответственно 364 и 292 г С/м²/год).

Таблица 7. Средневзвешенные значения микробного дыхания почв различного землепользования в основных биоклиматических зонах (г С/м²/год).

| Биоклиматическая зона | С/х угодья | Леса | Луга | Заболоченные земли | Общее среднее |
|---|------------|------------|------------|--------------------|---------------|
| Полярная пустыня | | | 4.5 | | 4.5 |
| Тундра | 101 | 92 | 71 | 80 | 73 |
| Северная тайга | 106 | 98 | 111 | 83 | 96 |
| Средняя тайга | 173 | 165 | 152 | 138 | 160 |
| Южная тайга | 273 | 255 | 280 | 242 | 257 |
| Леса умерен. пояса | 265 | 282 | 308 | 248 | 275 |
| Степи | 364 | 292 | 273 | 211 | 345 |
| Полупустыни | 228 | 270 | 185 | 163 | 209 |
| Средневзвешенное по классам землепользования | 307 | 173 | 121 | 128 | 171 |

Таблица 8. Микробный годовой поток СО₂ (числитель, Мт С/год) из почв, относящихся к различным категориям земель и биоклиматическим зонам, и соответствующие площади (знаменатель, млн. га).

| Биоклиматическая зона | Категории земель | | | | Сумма | % от суммы |
|-----------------------|------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|
| | С/х угодья | Леса | Заболоченные земли | Луга и пасбища | | |
| Тундра | <u>2.7</u> | <u>3.5</u> | <u>37</u> | <u>152</u> | <u>195</u> | <u>7.0</u> |
| | 3 | 4 | 46 | 212 | 270 | 16.6 |
| Северная тайга | <u>2.3</u> | <u>138</u> | <u>50</u> | <u>32</u> | <u>222</u> | <u>8.0</u> |
| | 2 | 141 | 60 | 29 | 233 | 14.3 |
| Средняя тайга | <u>31</u> | <u>752</u> | <u>107</u> | <u>202</u> | <u>1092</u> | <u>39.2</u> |
| | 18 | 455 | 77 | 132 | 682 | 41.8 |
| Южная тайга | <u>100</u> | <u>322</u> | <u>81</u> | <u>40</u> | <u>543</u> | <u>19.5</u> |
| | 37 | 127 | 34 | 14 | 211 | 13.0 |
| Леса умеренного пояса | <u>76</u> | <u>74</u> | <u>2</u> | <u>14</u> | <u>166</u> | <u>6.0</u> |
| | 29 | 26 | 1 | 4 | 60 | 3.7 |
| Степи | <u>423</u> | <u>27</u> | <u>2.5</u> | <u>59</u> | <u>512</u> | <u>18.4</u> |
| | 116 | 9 | 1 | 22 | 148 | 9.1 |
| Полупустыни | <u>27</u> | <u>3.5</u> | <u>0.5</u> | <u>22</u> | <u>53</u> | <u>1.9</u> |
| | 12 | 1 | 0.01 | 12 | 25 | 1.5 |
| Сумма | <u>661</u> | <u>1321</u> | <u>281</u> | <u>520</u> | <u>2783</u> | <u>100</u> |
| | 216 | 764 | 220 | 430 | 1629 | 100 |
| % от суммы | <u>23.8</u> | <u>47.5</u> | <u>10.1</u> | <u>18.6</u> | <u>100</u> | |
| | 13.3 | 46.9 | 13.5 | 26.3 | 100 | |

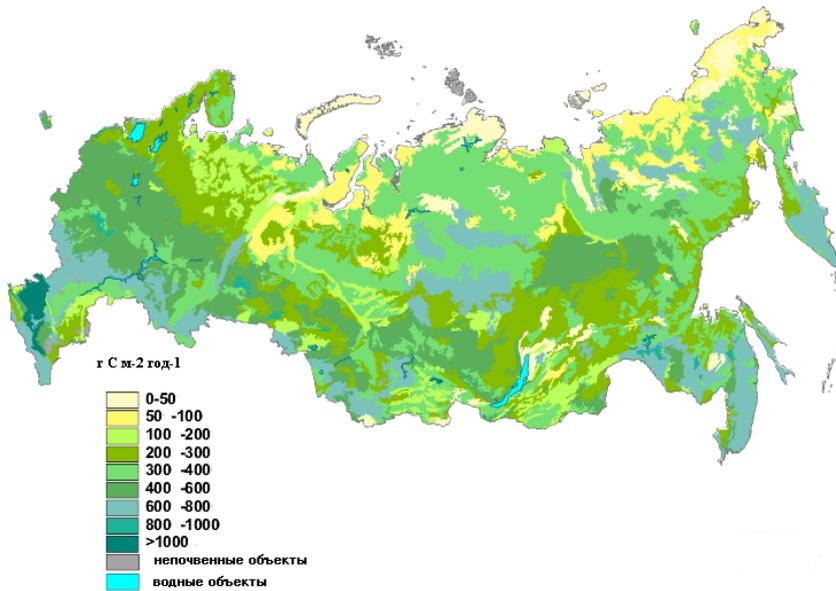


Рис.14. Карта общего годового дыхания почв на территории России.



Рис.15. Карта микробного дыхания почв на территории России.

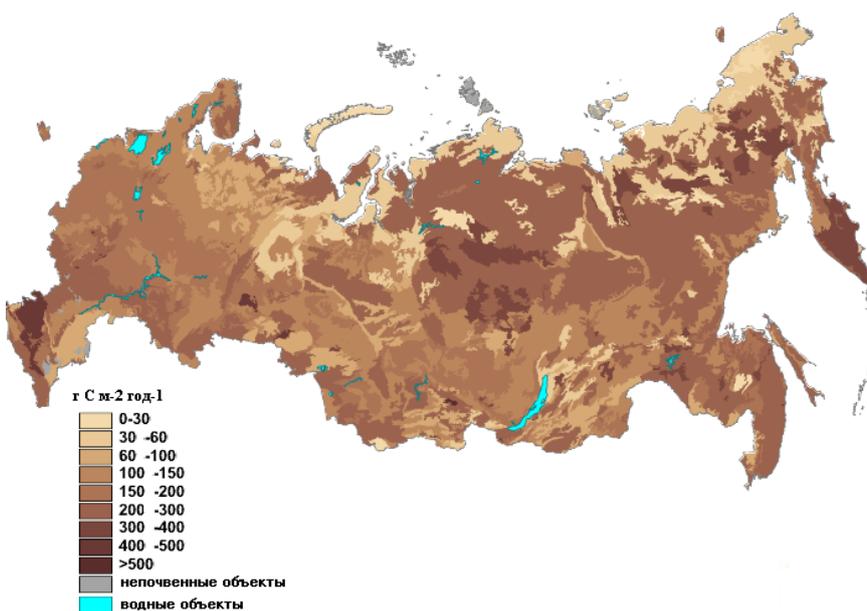


Рис.16. Карта корневого дыхания почв на территории России.

Проведенные расчеты показали, что микробное дыхание почв, занятых лесной растительностью, составляет примерно половину общего почвенного потока CO_2 на территории Российской Федерации (табл.8). На долю сельскохозяйственных, луговых и заболоченных земель приходится соответственно 1/4, 1/5 и 1/10 части. Самый высокий вклад в величину общего микробного дыхания в почвах России вносят леса средней тайги (27%), сельскохозяйственные земли степной зоны (15%) и лесные территории южно-таежной зоны (11%).

Необходимо подчеркнуть, что полученные оценки потоков CO_2 из почв Российской Федерации относятся к 1990 г., который является базовым для стран-участниц Киотского протокола, поскольку они строились на анализе литературных данных, большая часть которых была получена в 1950-1990 гг. прошлого столетия, а используемые карты (почвенная, землепользования и растительности) относятся к 1988-1990 гг. Неопределенности полученных значений общего, микробного и корневого дыхания почв наземных экосистем России велики и составляют не менее 50% (*Nilsson et al., 2000*). Они обусловлены, главным образом, временной и пространственной неравномерностью полевых измерений эмиссии CO_2 из почв Российской Федерации, недостатком экспериментальных данных в северных и горных территориях, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, а также весьма ограниченными данными по ИВ CO_2 из почв за пределами вегетационного сезона. Для получения более точных оценок суммарной эмиссии CO_2 из почв России и ее отдельных составляющих, необходимы прежде всего дополнительные полевые исследования и обновленные карты землепользования, поскольку соотношение различных категорий земель в Российской Федерации кардинальным образом изменились в начале 90-х гг. прошлого столетия.

Глава 7. Баланс углерода в залежных экосистемах умеренной зоны и на территории Российской Федерации

Геоботанические исследования, проведенные в залежных (пост-агрогенных) экосистемах показали, что после выведения почв из сельскохозяйственного использования в течение 5-10 лет происходило направленное изменение видового состава травостоя фитоценозов от сорных растений к преимущественно луговым (*Курганова и др., 2007; Kurganova et al., 2008*). Во всех изученных залежных экосистемах Московской области ассимиляция углерода растительностью превышала потери углерода из почв за счет эмиссии CO_2 в атмосферу. Величина этого превышения (стока) определялась возрастом залежи, типом растительности и погодными условиями года исследований. В 2004 году, основные метеорологические характеристики которого были близки к среднемноголетним, средняя величина стока углерода в залежных экосистемах составила 302 ± 164 г $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$. В 2007 году, который выдался экстремально засушливым, все исследуемые залежные экосистемы также выступали стоком углекислого газа атмосферы и величина их углеродного баланса в зависимости от возраста залежи изменялась от 116 до 392 г $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ (рис. 17), в среднем составляя 233 ± 48 г $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ (*Курганова и др., 2007; Kurganova et al., 2008*).

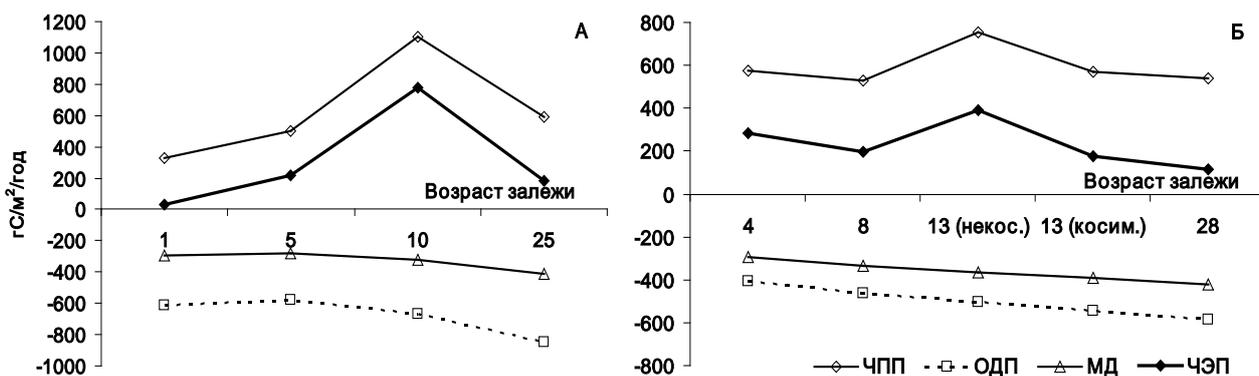


Рис. 17. Углеродный баланс и его основные компоненты в залежных экосистемах различного возраста на серых лесных почвах в 2004 (А) и 2007 (Б) гг.

Предварительные расчеты, сделанные нами на основе собственных полевых исследований и немногочисленных литературных данных (*Belleli Marchezini et al., 2007*), показали, что средняя величина стока углерода в залежных экосистемах в первые 15 лет восстановления составляла 245 ± 73 г C/m²/год. В пересчете на всю территорию Российской Федерации дополнительное связывание углерода атмосферы в залежных экосистемах в 1990-2006 годах оценивается приблизительно в 1093 ± 326 Мт С (для площади 30.2 млн. га) или 74 ± 22 Мт С/год. Таким образом, можно заключить, что залужение малопродуктивных пахотных почв может быть хорошей альтернативой лесоразведению с целью дополнительного связывания углерода и поможет решить задачи, стоящие перед Россией в свете выполнения требований Киотского протокола. Согласно оценкам, полученным в рамках Европейского лесного проекта (EUROFLUX), величины стока углерода в лесных экосистемах Европы, имеющих возраст от 7 до 30 лет, составляют 100-670 г C/m²/год (*Valentini et al., 2000*) и являются довольно близкими к полученным нами величинам углеродного стока в экосистемах залежей. Результаты, полученные в рамках Европейского проекта по изучению баланса парниковых газов в луговых экосистемах Европы (GreenGrass Project) с применением современного метода пульсационных измерений, показали, что обследованные луга, расположенные в 10 различных Европейских странах, также выступали стоком углерода, величина которого варьировала от 50 до 550 г C/m²/год в зависимости от географического положения, режима использования и возраста лугового ценоза (*Soussana et al., 2004*).

В последние годы территория нашей страны и оценка ее углеродного баланса все чаще привлекает внимание исследователей, поскольку, благодаря огромной площади, Россия играет значительную роль в глобальном цикле углерода. Базовые (относящиеся к 1990 г.) оценки основных компонентов углеродного баланса РФ составляют 4.41 и 2.78 Гт С/год для ЧПП (*Воронин и др., 1995*) и МД (*Kurganova, 2003; Кудеяров, Курганова, 2005*), соответственно. Антропогенная эмиссия CO₂ на территории РФ в 2002-2006 г. оценивается величиной 0.80 Гт С/год (*Kudeyarov et al., 2009; Kurganova et al., 2010*). Современный баланс углерода (в 2005-2006 гг.) на территории России, рассчитанный с учетом приведенных величин и дополнительного стока углерода, обусловленного изменениями в системе землепользования России

после 1990 г., составляет 0.90 Гт С/год или около 1/3 современного глобального стока углерода в наземные экосистемы планеты, который, в соответствии с различными оценками, варьирует от 2.1 до 2.7 Гт С/год (Ito et al., 2003; <http://www.globalcarbonprogect.org/carbonbudget>). Неопределенность величины углеродного баланса на территории России составляет не менее 50%, поскольку оценки основных потоков С, формирующих его, имеют неопределенности от 5 до 40% (Nilsson et al., 2000). Дополнительный сток углерода, обусловленный изменениями в сельском хозяйстве (74 Мт С/год), способен компенсировать около 70% современного уровня эмиссии CO₂ в сельскохозяйственном секторе нашей страны (108 Мт С/год) и около 20% - в индустриальном (409 Мт С/год).

Глава 8. Изменение запасов углерода в почвах России вследствие изменения системы землепользования в 1990-2005 гг.

Наши расчеты показали, что скорость аккумуляции углерода в бывшем пахотном слое (0-20 см) варьировала в широких пределах: от 42 до 279 г С/м²/год, в среднем составляя 99±14 г С/м²/год. Темпы накопления углерода зависели от типовой принадлежности почв и длительности периода, в течение которого почвы не обрабатывались (табл. 9).

Таблица 9. Средние скорости накопления углерода (±SE, г С/ м²/год) в основных типах почв РФ в зависимости от возраста залежи (слой 0-20 см).

| Возраст залежи, лет | Тип почвы | | | | Весь ряд почв |
|---------------------|---------------------|--------------|----------|------------|---------------|
| | Дерново-подзолистая | Серая лесная | Чернозем | Каштановая | |
| 1-15 | 131 ± 13 | 134 ± 36 | 175 ± 52 | 66 ± 24 | 132 ± 21 |
| 15-30 | 46 ± 7 | 67 ± 11 | 89 ± 30 | - | 67 ± 9 |
| 1-77 | 97 ± 22 | 102 ± 23 | 109 ± 32 | - | 99 ± 14 |

Как правило, темпы аккумуляции С_{орг} были выше в первые годы восстановления (1-15 лет) и заметно снижалась, когда период времени, в течение которого почвы не обрабатывались, составлял несколько десятков лет. Было найдено, что отрицательная логарифмическая функция удовлетворительно описывает зависимость скорости накопления углерода в почвах от длительности периода их восстановления, как для каждого типа почв в отдельности, так и для их совокупности (табл. 10).

Почвенное органическое вещество (ПОВ) включает в себя множество различных компонентов (пулов), отличающихся по их доступности к разложению (Six et al., 2002). Считается, что наиболее важным показателем устойчивого функционирования экосистемы является не столько количество (запас) углерода в почве, сколько время его пребывания в составе ПОВ или какого-либо из его пулов (Six and Jastrow, 2002). На примере черноземов обыкновенных и серых лесных почв было показано, что выведение почв из сельскохозяйственного производства привело к усилению дыхательной активности, увеличению содержания микробного углерода и его доли в составе

общего пула $C_{\text{орг}}$ залежных почв по сравнению с пахотными (Курганова и др., 2006; Kurganova et al., 2007). Кроме того, в черноземах обыкновенных возросло содержание трудноминерализуемой (более стабильной) фракции в составе ПОВ: от 20.6 мг С/г почвы на пашне до 28.6 мг С/г почвы - в 77-летней залежи, а время ее пребывания в составе ПОВ увеличилось в 1.9-2.2 раза (Lopes de Gerenyu et al., 2008; Lopes de Gerenyu et al., 2009). Проведенные исследования позволили заключить, что при выведении пахотных черноземов из сельскохозяйственного производства накопление углерода в бывшем пахотном горизонте происходило, главным образом, за счет увеличения содержания наиболее стабильных фракций в ПОВ.

Таблица 10. Логарифмические модели для расчета скорости накопления углерода (слой 0-20 см) в зависимости от возраста залежи, А (* - модель значима при $F < 0,01$; ns- модель не значима).

| Возраст залежи, лет | Тип почвы | | | | Весь ряд почв |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | Дерново-подзолистая | Серая лесная | Чернозем | Каштановая | |
| Модель | $-54\ln P + 238$ | $-60\ln P + 261$ | $-70\ln P + 317$ | $-17\ln P + 111$ | $-53\ln P + 250$ |
| n | 5 | 10 | 18 | 6 | 41 |
| R ² | 0.89* | 0.74* | 0.71* | 0.21 ^{ns} | 0.63* |

Расчеты величины общего накопления углерода в бывших пахотных почвах России, проведенные с применением различных подходов, показали (табл. 11), что в зависимости от метода расчета общая величина накопления $C_{\text{орг}}$ в почвах России за период 1990-2005 гг. оценивается от 196 до 319 Мт С, а неопределенность оценок, вызванная разной методологией подсчета невысока и составляет приблизительно 8%.

Таблица 14. Оценки общего накопления углерода (млн. т) в почвах Российской Федерации в 1990-2005 гг. с использованием разных подходов.

| Подход | Аппроксимация | Почвенно-геоинформационный | Модельный |
|--------------------|---------------|----------------------------|-----------|
| Общий | 292 | - | 202 |
| Равные доли | 274 | 319 | 215 |
| Дифференцированный | 241 | 276 | 196 |

Если допустить, что по своей обоснованности используемые методы расчета равнозначны, то оценка среднего накопления углерода в почвах России составляет 252 ± 32 Мт С ($\alpha = 5\%$) для площади 14.8 млн. га. Эта величина очень близка к последней оценке, представленной в работе А.А Романовской (2008) и составляющей 248 Мт С за тот же период (модель RothC), но полученной для площади почти в 2 раза большей (27.9 млн. га). Важно отметить, что органическое вещество, накопленное в залежных почвах, формирует чистую

биомную продукцию экосистем (ЧБП) и представляет собой долговременный резервуар углерода, время пребывания в котором на порядок выше, чем в «лесах Киото».

Проведенные расчеты показали также, что к 2005 г. увеличение запасов органического вещества в бывшем пахотном слое произошло на 1.7-2.8% по сравнению с началом 90-х годов прошлого столетия. В целом же, величина секвестра углерода за счет исключения земель из сельскохозяйственного пользования, в среднем составляющая 17 ± 2 МтС в год, является весьма ощутимой, и ее целесообразно учитывать в Национальных сообщениях России Секретариату Рамочной конвенции ООН по климатическим изменениям.

ВЫВОДЫ:

1. На основе непрерывных 11-летних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO_2 впервые получены оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из почв южно-таежной зоны и оценена их межгодовая вариабельность. В зависимости от типа растительности среднемноголетние годовые потоки CO_2 из дерново-подзолистой и серой лесной почв изменялись от 381 ± 78 до 809 ± 100 г $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$, а их межгодовая вариабельность составляла 13-21% для почв естественных экосистем и 33-37% - для почвы агроценоза.

2. Разработаны эмпирические модели, описывающие взаимосвязь между величиной суммарной годовой эмиссии CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны и количеством осадков за весенне-летний период. Показано, что в условиях южно-таежной зоны основным фактором, определяющим и контролирующим величины годовых потоков CO_2 из почв, является сумма осадков за период весна-лето.

3. Температура почвы является основным предиктором среднесуточных и среднемесячных потоков CO_2 из почв. Коэффициенты эмпирических моделей (линейных и экспоненциальных), описывающих взаимосвязь между скоростью выделения CO_2 и температурой почвы, зависели от временных, температурных и влажностных интервалов, внутри которых проводился расчет. Межгодовая вариабельность температурных коэффициентов Q_{10} для дыхания почв в различных экосистемах южно-таежной зоны составляла 27-47%.

4. Выделение CO_2 из сезонно-промерзающих почв южно-таежной зоны не прекращается в зимнее время года и в полностью промерзшей почве. Эмиссия CO_2 в холодный период (ноябрь-апрель) составляет существенную часть в суммарном годовом потоке CO_2 из почв южно-таежной зоны и она должна учитываться при оценке суммарных годовых потоков CO_2 из почв.

5. Замораживание и последующее оттаивание почв инициирует значительный по величине, но непродолжительный по времени всплеск эмиссии CO_2 , имеющий место во время оттаивания почв. Величина этого всплеска зависит от влажности почв и особенностей их землепользования. Часто повторяющиеся

циклы промерзания-оттаивания почв, имеющие место в условиях бореальной и умеренной зон, могут внести значительные коррективы в величины сезонных и годовых потоков CO_2 из почв, особенно при современных изменениях климата.

6. Наиболее стабильным показателем, характеризующим особенности эмиссии CO_2 из почв, является вклад суммарной летней эмиссии в годовой поток CO_2 из почв, что позволяет рекомендовать использовать этот показатель для расчета годовых потоков углекислого газа из почв. Обнаружена тесная негативная связь между величиной вклада летнего периода в годовой поток CO_2 и среднегодовой температурой воздуха.

7. Тип растительности значимо влиял на величину эмиссии CO_2 из почв одного типа. Вариабельность интенсивности выделения CO_2 из различных типов почв Европейской части России, обусловленная особенностями землепользования, составляла от 28% (данные многолетних мониторинговых наблюдений) до 36-62% (данные модельных экспериментов). Влияние типа землепользования сказывалось как на абсолютной величине потоков CO_2 из почв (суточных, месячных, сезонных), так и на их перераспределении между отдельными сезонами года. Для адекватной характеристики потоков CO_2 из почв более корректно использовать не простое (арифметическое) среднее, а средневзвешенные значения, учитывающие пропорции различных категорий земель в пределах одного почвенного типа.

8. Общее, микробное и корневое дыхание почв на территории Российской Федерации, составляет соответственно 5.67, 2.78 и 2.89 Гт С/год. Полученные оценки относятся к 1990 г. и базируются на использовании дифференцированной методологии расчета, результатах собственных многолетних мониторинговых наблюдений, анализе литературных данных, модельном и геоинформационном подходах.

9. Бывшие пахотные почвы после 4-5 лет залежного развития являются устойчивым стоком диоксида углерода атмосферы. Для всей территории Российской Федерации дополнительный сток CO_2 атмосферы вследствие перехода бывших пахотных угодий в залежные земли составил 74 ± 22 Мт С/год, что может компенсировать около 70% современной эмиссии CO_2 в сельскохозяйственном секторе, около 20% - в индустриальном. Залужение малоплодородных пахотных почв является хорошей альтернативой лесоразведению с целью дополнительного связывания углерода.

10. Современный баланс углерода на территории России на момент 2005-2006 гг. оценивается приблизительно 0.9 Гт С/год, свидетельствуя в пользу того, что Россия выступает абсолютным стоком диоксида углерода атмосферы. Неопределенность данной оценки высока и составляет не менее 50%.

11. При выведении почв из сельскохозяйственного использования, как правило, происходит увеличение запасов углерода в почвенном профиле. Темпы накопления углерода в почвах зависят от их типовой принадлежности, длительности периода восстановления и мощности слоя, для которого производилась оценка скорости С-аккумуляции. Наиболее высокие скорости накопления углерода характерны для первых 10-15 лет восстановления почв.

12. Дополнительное накопление углерода в почвах Российской Федерации в результате изменения системы землепользования в России в 1990-2005 гг. составило 252 ± 32 Мт С. Величина секвестра углерода за счет исключения земель из сельскохозяйственного пользования, в среднем составляющая 17 ± 2 Мт С в год, является весьма ощутимой, и ее целесообразно учитывать в Национальных сообщениях России Секретариату Рамочной конвенции ООН по климатическим изменениям.

Список принятых сокращений:

C_{орг} – органический углерод;

ЧПП – чистая первичная продукция;

ЧЭП – чистая экосистемная продукция;

ЧБП – чистая биомная продукция;

ПОВ – почвенное органическое вещество;

ОДП – общее дыхание почвы;

МД и КД – микробное и корневое дыхание;

ИВ CO₂ – интенсивность выделения CO₂ из почв;

ДА – дыхательная активность;

ППВ – полная полевая влагоемкость;

Тп – температура почвы;

Wп – влажность почвы;

Тп – температура почвы;

Тв – температура воздуха;

ЦЗО – цикл замораживания- оттаивания;

STD – стандартное отклонение;

SE – стандартная ошибка;

ДИ – доверительный интервал;

R² – коэффициент детерминации;

R – коэффициент корреляции;

n – число повторностей в эксперименте;

CV – коэффициент вариабельности, %

F – уровень достоверности;

α – уровень значимости, %;

ЦЗО – цикл замерзания-оттаивания;

AF – суммарные годовые потоки диоксида углерода;

Cs – доля летнего сезона в годовом потоке CO₂ из почв;

Fs – суммарный почвенный поток CO₂ за летний период (июнь-август);

Мт – мега тонна (10⁹ г); **Гт** – гига тонна (10¹² г).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*

1. **Курганова И.Н., Кудеяров В.Н.** Оценка потоков диоксида из почв таежной зоны России. *Почвоведение*. 1998. №9. С. 1058-1070.
2. **Kudeyarov V.N., Kurganova I.N.** Carbon dioxide emission and net primary production of Russian terrestrial ecosystems. *Biol. Fertil. Soils*. 1998. Vol. 27. P. 246-250.
3. **Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н.** Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России. *Почвоведение*. 2001. №9. С. 1045-1059.
4. **Lopes de Gerenyu V., Kurganova I., Sapronov D.** Carbon dioxide fluxes from arable soils as affected by temperature and moisture. *Proceedings of I World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid, 1-5 October 2001. Vol. 2. P. 109-113.
5. **Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Sapronov D.** CO₂ Emissions from Russian South-taiga soils as affected by temperature and land use. *Extended Abstracts of 6-th International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Japan, October 1-5, 2001*. P. 540-543.
6. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А.** Мониторинг эмиссии CO₂ из лесных почв Южного Подмосковья. *Материалы совещания "Лесные стационарные исследования: методы, результаты перспективы"*, Москва, 18-20 сентября 2001. С. 362-365.
7. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Кудеяров В.Н.** Оценка эмиссии диоксида углерода из пахотных серых лесных почв. *Агрехимия*. 2002. № 9. С. 52-57.
8. **Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Rozanova L.N., Sapronov D.V., Myakshina T.N., Kudeyarov V.N.** Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils. *Tellus 55B*. 2003. P. 338-344.
9. **Larionova A.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Yermolayev A.M., Kurganova I.N. and Blagodatsky S.A.** Land use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia's south-taiga zone. *Tellus 55B*. 2003. P. 331-337.
10. **Курганова И.Н., Туне Р.** Влияние процессов замерзания-оттаивания на дыхательную активность почв. *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1095-1105.
11. **Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес де Гереню В.О.** Дыхание корней и его вклад в эмиссию CO₂ из почвы. *Почвоведение*. 2003. № 2. С. 183-194.
12. **Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Sapronov D.V.** Carbon dioxide fluxes from arable soils as affected by temperature and moisture. *Conservation Agriculture: Environment, Farmers experiences, Innovations, Socio Economy, Policy*. Kluwer Academic Publisher, Nitherlands. 2003. P. 355-359.
13. **Kurganova I., R. Teepe, V. Lopes de Gerenyu, N. Lofffield** Gaseous carbon and nitrogen Losses from agricultural soils induced by freeze-thaw processes. *Practical Solutions for Managing Optimum C and N Content in Agricultural Soils – II*, Czech University of Agriculture, Prague. 2003. P. 233-242.
14. **Kurganova I.N.** Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems. *Interim Report, IR-02-070*. 2003. IIASA, Laxenburg, Austria. (web: www.iiasa.ac.at) 64p.
15. **Kurganova I.N., Rozanova L.N., Myakshina T.N., Kudeyarov V.N.** Monitoring of CO₂ emission from soils of different ecosystems in Southern part of Moscow region: data

* Жирным шрифтом выделены публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК России для публикации результатов диссертационных работ

- base analyses of long-term field observations. *Eurasian Soil Science*. 2004. Vol. 37, Supplement 1. P. 74-78.
16. **Благодатский А.С., Курганова И.Н., Кудеяров В.Н.** Годовая эмиссия и баланс CO_2 в почвах лесных и луговых экосистем Приокско-Террасного заповедника. *Вестник МГУ, сер. Биология*. 2004. № 1. 32-37.
 17. **Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Типе Р., Лофтфильд Н.** Влияние процессов замораживания – оттаивания на эмиссию парниковых газов из пахотной буроземной почвы. *Агрохимия*. 2004. № 2, С. 23-30.
 18. **Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Федченко Ю.Ю., Лопес де Гереню В.О.** Влияние температуры на скорость выделения CO_2 из основных типов почв Европейской части России. *Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии*: сб. статей под ред. акад. Н.П. Лаверов. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН. 2004. 92-97.
 19. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н.** Мониторинг эмиссии CO_2 из почв различных экосистем южного Подмосковья: анализ данных многолетних полевых наблюдений. *Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии*: сб. статей под ред. акад. Н.П. Лаверов. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН. 2004. 87-92.
 20. **Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Лопес де Гереню В.О.** Вклад корней и микроорганизмов в эмиссию CO_2 из серой лесной и дерново-подзолистой почв. *Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии*: сб. статей под ред. акад. Н.П. Лаверова, ОНТИ НЦБИ Пущино. 2004. С. 112-117.
 21. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Кудеяров В.Н.** Оценка потоков углерода из почв лесной зоны России: мониторинговые наблюдения, методология, моделирование. *Материалы IV съезда ДООП, Новосибирск*. 2004. Книга 1. С. 356-358.
 22. **Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Kudeyarov V.N., Shvidenko A. Z.** Assessment of annual CO_2 fluxes from soils in forest zone of Russia: Data base analysis, monitoring, modelling, methodology. *CD-ROM Proceeding of Eurosoil Congress, Freiburg, Germany*: 2004. P. 225-234.
 23. **Кудеяров В.Н., Курганова И.Н.** Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, моделирование, общие оценки. *Почвоведение*. 2005. N 9. С. 1112-1121.
 24. **Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N.** Effect of temperature and moisture content on CO_2 evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment*. 2005. Vol. 51. N5. P. 213-219.
 25. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Кудеяров В.Н.** Углерод в почвах лесных и луговых экосистем Приокско-Террасного Биосферного Заповедника: запасы, эмиссионные потери, баланс. *Экосистемы Приокско-Террасного Биосферного Заповедника*: Сб. научн. тр., Пущино. ОНТИ ПНЦ РАН. 2005. С. 9-18.
 26. **Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолодчиков Д.Г., Кудеяров В.Н.** Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв. *Методы исследований органического вещества почв*: Сб. статей, Владимир. 2005. С. 408-425.
 27. **Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.** Empirical models of carbon fluxes from forest and grassland soils of Russian sub-boreal zone. *Proceedings of the Fifth European*

- Conference on Ecological Modelling*, Pushchino, Russia, September 19-23, 2005. P. 106-107.
28. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Сапронов Д.В., Келлер Т., Ланге Ш., Розанова Л.Н., Личко В.И., Мякшина Т.Н., Кузяков Я.В., Романенков В.А. Потоки и пулы углерода в залежных землях Подмосковья. *Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв: Сб. научных трудов под ред. В.Н. Кудеярова, М.: Наука. 2006. С. 271-284.*
 29. Потоки и пулы углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский, А.В. Борисов, П.Ю. Воронин, В.А. Демкин, Т.С. Демкина, И.В. Евдокимов, Д.Г. Замолотчиков, Д.В. Карелин, А.С. Комаров, И.Н. Курганова, А.А. Ларионова, В.О. Лопес де Гереню, А.И. Уткин, О.Г. Чертов // отв. ред. Г.А. Заварзин М.: Наука, 2007. 315 с.
 30. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Келлер Т., Ланге Ш., Кузяков Я.В. **Баланс углерода в залежных землях Подмосковья. Почвоведение. 2007. № 1. 60-68.**
 31. Kurganova I., Teepe R., Loftfield N. Influence of freeze-thaw events on carbon dioxide emission from soil at different moisture and land use. *Carbon Balance and Management*. 2007. 2:2. P. 1-9.
 32. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. Многолетний мониторинг эмиссии CO₂ из дерново-подзолистой почвы: анализ влияния гидротермических условий и землепользования. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Прод. издание, Том XXI. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат. 2007. С. 23-44.
 33. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Sukhanova N., Kerimzade V. Carbon pools and respiratory activity of the former arable lands in Russian Federation. *Proceeding of International Symposium "Organic matter dynamics in agro-ecosystems"* Poitiers, France, 16-19 July 2007. P. 245-246.
 34. Lopes de Gerenyu V., Kurganova I. CO₂ emission from agricultural soils of Russian Federation: total estimations, interannual variability and effect of soil temperature. *Proceeding of International Symposium "Organic matter dynamics in agro-ecosystems"* Poitiers, France, 16-19 July 2007. P. 121-122.
 35. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н., Лопес де Гереню В.О. Баланс и эмиссия CO₂ из почв Российской Федерации: мониторинг, методология, общие оценки. *Материалы Международной научно-практической конференции «Экология биосистем: проблемы изучения, индикации, прогнозирования»*, Астрахань, 20-25 августа 2007, часть 1. 139-140.
 36. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. Оценка газообразных потерь углерода из почв агроэкосистем Российской Федерации. *Труды IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере»*, Санкт-Петербург. 2007. С. 54-57.
 37. Давыдова А.Ю., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Квасова А.М., Личко В.И., Ермолаев А.М., Сапронов Д.В., Розанова Л.Н. Баланс углерода в залежных экосистемах различного возраста. *Труды IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере»*, Санкт-Петербург. 2007. С. 233-236.
 38. Квасова А.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Давыдова А.Ю., Гультяева Е.М. Влияние землепользования на гумусное состояние и дыхательную активность серых лесных почв. *Труды IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере»*. Санкт-Петербург, 2007. С. 260-264.

39. Суханова Н.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Керимзаде В. Изменение содержания органического углерода и дыхательной активности чернозема обыкновенного под влиянием зарастания естественной растительностью. *Труды IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере»*, Санкт-Петербург. 2007. С. 310-314.
40. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. Assessment of changes in soil organic carbon storage in soils of Russia, 1990-2020. *Eurasian Soil Sci.* 2008. Supplement. Vol. 41. N 13. P. 1371-1377.
41. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Lichko V.I., Yermolaev A.M. Changes in the carbon stocks of former croplands in Russia. *Žemės Ūko Mokslai.* 2008. V. 15. N 4. P. 10-15.
42. Lopes de Gerenyu V., Kurganova I., Kuzyakov Ya. Carbon pools and sequestration in former arable Chernozems depending on restoration period. *Ekologija.* 2008. Vol.54. N 4. P. 38-44.
43. Kurganova I.N., Gallardo Lancho J.F., Lopes de Gerenyu V.O. Comparison of organic-carbon pool of soil belonging to temperate forests of Russia and Spain. *Proceedings of International Conference “Man and environment in boreal forest zone: past, present and future”*. July 24 – 29, 2008. P. 50-51.
44. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Myakshina T.N. and Sapronov D.V. Temperature effect on CO₂-fluxes from soils in two forest ecosystems of Moscow region. *Proceedings of International Conference “Man and environment in boreal forest zone: past, present and future”*. July 24 – 29, 2008. P. 58-59.
45. Kurbatova J., Varlagin A., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V. Soil CO₂ fluxes: methodology of measurements and role in carbon balance of nature ecosystems. *Proceedings of Russian-Mongolian Symposium “Global and regional features of ecosystems transformation in Baikal region”*, September 9-11, 2008. Ulan-Bator, Mongolia, 184-188.
46. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. Запасы органического углерода в почвах Российской Федерации: современные оценки в связи с изменением системы землепользования. *Доклады Академии наук.* 2009. Т. 426. №1. С.132-134.
47. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В. Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов. *Агрохимия.* 2009. № 5. С. 5-12.
48. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. К чему ведет сокращение пахотных земель. *Природа.* 2009. № 11. С. 20-27.
49. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия диоксида углерода в агроэкосистемах на серых лесных почвах в условиях изменяющегося климата. *Почвоведение.* 2010. № 2. С.
50. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Швиденко А.З., Сапожников П.М. Изменение общего пула органического углерода в почвах России в 1990-2004 гг. *Почвоведение.* 2010. № 3. С.
51. Kurganova I.N., Kudayarov V.N. , and Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian Territory. 2010. *Tellus B.* (submitted)
52. Belelli Marchesini L., Vuichard N., Ciais P., Kurganova I., Valentini R. Carbon credits from abandoned croplands of former USSR. *Geoscience* 2010. (submitted)

68 работ опубликовано в сборниках тезисов российских и международных конференций.