

На правах рукописи

РОМАНОВСКАЯ АННА АНАТОЛЬЕВНА

**ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ И СТОКОВ
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ (CO₂, N₂O, CH₄) В ЖИВОТНОВОДСТВЕ, ПРИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ И ИЗМЕНЕНИИ
ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИИ**

03.00.16.- Экология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Москва – 2008 г.

Работа выполнена в ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,
академик РАСХН, профессор Алексахин Р.М.

доктор биологических наук
профессор Степанов А.Л.

доктор биологических наук
А.С. Комаров

Ведущая организация: кафедра Общей экологии биологического
факультета Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится “___” _____ 2008г. в _____ часов на
заседании Диссертационного совета Д 002.049.01 по специальности 03.00.16 –
“Экология” в Институте глобального климата и экологии по адресу: 107258,
Москва, ул. Глебовская, д.20-Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института глобального
климата и экологии по адресу: 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20-Б.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании
диссертационного совета. Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять по адресу: 107258, Москва, ул. Глебовская, д.
20-Б, Диссертационный совет ИГКЭ.

Автореферат разослан “___” _____ 2008г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор географических наук

Г.М. Черногаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время глобальное изменение климата, в основном, связывается с увеличением концентраций парниковых газов в атмосфере в результате антропогенной деятельности (IPCC, 2007). Заметный вклад в это увеличение вносят отрасли животноводства и сельскохозяйственного землепользования, а также изменения в землепользовании (IPCC, 2007; Houghton, 2003).

Озабоченность мировой общественности проблемой изменения климата выразилась в принятии ряда международных соглашений. Так в 1992г. 154 странами была подписана рамочная Конвенция ООН об изменении климата (РКИК), а 16 февраля 2005г. вступил в силу Киотский протокол (UNFCCC, 1992; Киотский протокол, 1998). Согласно РКИК, все страны, включенные в приложение I (члены Организации экономического сотрудничества и развития и страны с переходной экономикой), обязаны предоставлять ежегодную отчетность по антропогенным выбросам парниковых газов на их территории (UNFCCC, 1992). Перед Россией также стоит задача подготовки ежегодной отчетности и контроля антропогенных выбросов парниковых газов.

Таким образом, очевидна необходимость обоснования, разработки методологии и создания системы мониторинга эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения. Учитывая высокую степень неопределенности оценок биогенных эмиссий парниковых газов, такая система должна быть, прежде всего, разработана для сельскохозяйственных источников и стоков, включая животноводство, сельскохозяйственное землепользование, а также изменение землепользования. Это позволит уточнить общие оценки антропогенного вклада в атмосферные концентрации парниковых газов и возможное их влияние на климат, а также позволит получать более достоверную информацию, необходимую для принятия решений по возможностям контроля и сокращения эмиссий парниковых газов в рассматриваемых отраслях деятельности.

Цель работы. Целью работы является обоснование и разработка методологии мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования, а также оценка вклада залежных земель России в поглощение атмосферного CO₂.

Задачи исследования.

– на основе концепции мониторинга антропогенных изменений в биосфере разработать основы системы расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов, определить ее основные задачи, методы и эффективность использования результатов;

– выявить категории источников и поглотителей, которые характеризуются наибольшим вкладом в глобальные эмиссии и стоки CO₂, CH₄ и N₂O в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования;

– усовершенствовать методологии оценки эмиссий парниковых газов от ведущих категорий источников и стоков поглотителями при сельскохозяйственной деятельности, учитывая ее специфику и географические особенности Российской Федерации;

– выполнить апробацию разработанных методологий расчета при составлении национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов за 1990 – 2005 гг. в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании;

– провести анализ возможности применения метода математического моделирования при расчетном мониторинге эмиссий и стоков CO₂ от почв залежных земель России;

– выполнить сравнительный анализ результатов модельных расчетов с экспериментальными данными по оценке запасов почвенного органического углерода залежных земель;

– подготовить входные данные, откалибровать параметры модели в соответствии с экспериментальными данными и определить оптимальный масштаб для проведения моделирования изменения почвенного органического углерода на залежных землях России;

– на основе результатов моделирования оценить вклад почв залежных земель России в поглощение атмосферного CO₂;

– провести оценку неопределенности данных расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования.

Научная новизна работы.

– впервые разработана концепция и основы расчетного мониторинга эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения;

– усовершенствованы методы расчета антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов по целому комплексу категорий источников и поглотителей в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования (зарастание брошенных пахотных угодий) в России;

– проведена апробация разработанных методологий расчета при составлении национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов за 1990 -2005 гг.; выявлены основные причины трендов эмиссий и стоков CO₂, CH₄ и N₂O в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании в течение рассматриваемого периода;

– выполнен сравнительный анализ данных модельных расчетов и экспериментальных результатов по изменению запасов почвенного углерода залежных земель России; получены зависимости по изменению продуктивности растений на залежных землях разного возраста в ряде биоклиматических и растительных зон страны;

– впервые проведена калибрация параметров модели RothC для условий залежных земель;

- впервые получена оценка общего поглощения атмосферного CO_2 почвами залежных земель России за период с 1990 по 2005 г.;

- проведена оценка неопределенности данных расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования.

Практическая значимость работы. Система расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования, позволяет не только проводить систематические оценки выбросов и стоков от рассматриваемых категорий источников и поглотителей, но и использовать их при определении степени глобального антропогенного воздействия на атмосферу, и, в конечном счете, на климат. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты способствуют развитию научных знаний о глобальном цикле углерода в биосфере и возможностям наземных экосистем по поглощению атмосферного CO_2 .

Результаты мониторинга использованы при составлении Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, ежегодного подаваемого Россией в Секретариат рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Кроме того, показана возможность выполнения прогнозных оценок потоков парниковых газов, разработки мер по регулированию этих величин и оценки эффективности предлагаемых мер. Данные мониторинга предоставляют убедительный материал для формирования стратегий развития агропромышленного комплекса с учетом эмиссий парниковых газов и мер по их сокращению. Все перечисленные функции созданной системы мониторинга являются ключевыми при выполнении обязательств Российской Федерации, предусмотренных рамочной Конвенцией ООН об изменении климата и Киотским протоколом.

В настоящее время проводятся подготовительные работы по включению методологической базы, разработанной в системе расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования, в систему автоматической оценки потоков парниковых газов на территории России методами дистанционного зондирования (ЦПAM «Аэрокосмос»).

Защищаемые положения.

- теоретические основы системы расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов;

- методологии расчета эмиссии CH_4 от кишечной ферментации сельскохозяйственных животных и систем сбора и хранения навоза и помета; методологии оценки прямой и косвенной эмиссии N_2O от систем сбора и хранения навоза и помета и N_2O от пахотных почв; методологии оценки потоков CO_2 на почвах пахотных и кормовых угодий России;

- тенденции изменения эмиссий CH_4 , N_2O и CO_2 от рассматриваемых источников в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании в России за период с 1990 по 2005 год;

– величины среднего накопления запасов почвенного органического углерода на залежных землях, расположенных в разных климатических и растительных зонах страны (Мурманской, Московской, Свердловской областей и Ставропольского края);

– величина общего поглощения атмосферного CO₂ почвами залежных земель России за период с 1990 по 2005 г.

Личный вклад автора заключается в разработке теоретических положений расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и его изменении. Разработка и усовершенствование методологий расчета, а также их апробация проведены лично автором. Автор лично проводила экспериментальные исследования, выполняла обработку полученных результатов, проводила оценку их качества, а также выполнила калибровку параметров модели RothC и моделирование изменения запасов органического углерода залежных земель России.

Апробация. Материалы работы были доложены: на Конференции молодых ученых национальных гидрометслужб стран СНГ (Москва, 1999); третьем съезде Докучаевского общества почвоведов (Суздаль, 2000); международной конференции “Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии” (Пушино, 2000); 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy (Washington, 2001); 3rd International Symposium «Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific understanding, control options and policy aspects» (Maastricht – Netherlands, 2002); 17th World congress of soil science «Confronting new realities in the 21st century» (Bangkok, 2002); Юбилейной Всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002); Второй Международной Конференции «Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии» (Пушино, 2003); Международной научной конференции «Экология и биология почв» (Ростов-на-Дону, 2004); 3rd International Nitrogen Conference (Nanjing, China, 2004); Международной конференции «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, 2004); Международной конференции «Биосферные функции почвенного покрова» (Пушино, 2005); Международном симпозиуме «Методы исследований органического вещества почв» (Владимир, 2005); Seventh International Carbon Dioxide Conference (Colorado, 2005); International conference of Earth System Science Partnership “Open Science Conference” (Beijing, 2006); Workshop on Agricultural Air Quality «State of the Science» (Washington, 2006); Международной конференции «Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского)» (Апатиты, 2006); Open Science Conference on GHG Cycle in Northern Hemisphere (Sissi-Lassithi, Crete, 2006); Второй конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государств-участников СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии» (Москва, 2006); III Международной конференции «Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии», (Пушино, 2007); International 4th Nitrogen Conference (Bahia, Brazil, 2007); Всероссийской конференции «Развитие

системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА)» (Москва, 2007); IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере» (Москва, 2007); Всероссийской научной конференции «Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота» (Москва, 2008); International Scientific Conference on 50-years jubilee of the Lithuanian Soil Science Society (Lithuania, 2008).

Публикации. По полученным в ходе исследования данным опубликовано 47 научных работ, из них 17 работ в рецензируемых периодических сборниках и журналах, 8 работ в сборниках, и 22 тезисов конференций. 4 статьи приняты в печать.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем – 419 страниц, включая 82 рисунка, 58 таблиц, 34 стр. приложения. При написании диссертации было использовано 424 литературных источника, из которых 202 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Понятие и основы мониторинга окружающей природной среды были сформулированы в 1974г. Ю.А. Израэлем (Израэль, 1974). Основными задачами мониторинга антропогенных изменений окружающей природной среды являются с одной стороны, наблюдения за состоянием биосферы, оценка и прогноз ее состояния, вызванные антропогенным воздействием; с другой стороны, это определение степени такого воздействия (с выявлением антропогенных эффектов) и выявление источников и факторов воздействия (Израэль, 1984).

В настоящее время понятие «загрязнение» нередко отождествляют с понятием «токсичности». Известно, что в роли загрязнителя может выступать любой природный или антропогенный агент, который попадает в природную среду в количествах, превышающих фоновые значения (Реймерс, 1990). Поэтому мониторинг содержания парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере относится к мониторингу загрязнений окружающей природной среды. Он также включает элементы экологического, климатического и спутникового мониторинга и может выполняться на локальном, региональном и глобальном уровнях методами прямого и косвенного наблюдения.

На основе проведенного анализа литературы установлены источники и поглотители CO₂, N₂O и CH₄ (см. рис.1.), которые должны быть включены в структуру разрабатываемой системы мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования. Данных для разработки методологий оценки поглощения CH₄ и N₂O на сельскохозяйственных землях, а также потоков этих газов при изменении землепользования в настоящее время

недостаточно. Эмиссии CO_2 от животноводства и сжигания биомассы не оцениваются в системе мониторинга, так как годовые результирующие эмиссии предполагаются равными нулю – CO_2 , связываемый культурными растениями при фотосинтезе, возвращается в атмосферу при дыхании животных, разложении органической части навоза и сжигании биомассы.

Согласно существующим глобальным оценкам бюджета рассматриваемых парниковых газов, сельскохозяйственная деятельность человека является ведущим антропогенным источником N_2O и CH_4 (IPCC, 2007). Изменение землепользования, прежде всего, сведение лесов и распашка целинных земель в тропиках определяет эмиссию CO_2 , сравнимую по величине с индустриальной (Houghton, 2003). Для большинства источников Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) разработала методические руководства, которые могут быть частично использованы в создаваемой системе мониторинга. Разработка уточненных методологий расчета антропогенных потоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и его изменении на региональном уровне позволит улучшить глобальные оценки антропогенного вклада в увеличение атмосферных концентраций этих газов.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является система мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов (CO_2 , N_2O и CH_4) в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования. Содержание сельскохозяйственных животных и птицы, а также системы сбора и хранения навоза и помета рассматриваются в категории животноводства. Сельскохозяйственное землепользование включает пахотные земли под посевами культурных растений, многолетними насаждениями или паром; а также пастбища и сенокосы. Земли, на которых проведено изменение типа их использования, в настоящей работе включают брошенные сельскохозяйственные угодья (залежи).

При разработке методологий мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов использован ряд критериев: полнота охвата источников и поглотителей; выбор оптимального масштаба расчетов; анализ доступности входных данных; анализ степени сложности расчетов; определение оптимального набора воздействующих факторов среды; анализ методов ведения хозяйства и др., что позволило разработать более точные методы расчета, учитывающие специфику ведения сельскохозяйственной деятельности, а также климатические, почвенные и географические особенности России, по сравнению с методами из руководств МГЭИК. Применение легкодоступных входных данных и усовершенствованных пересчетных коэффициентов на основе разработанных программных алгоритмов расчета способствуют выполнению мониторинга на всех уровнях от локального до национального с минимальными затратами. Уточнение пересчетных параметров основывалось на анализе данных литературы.

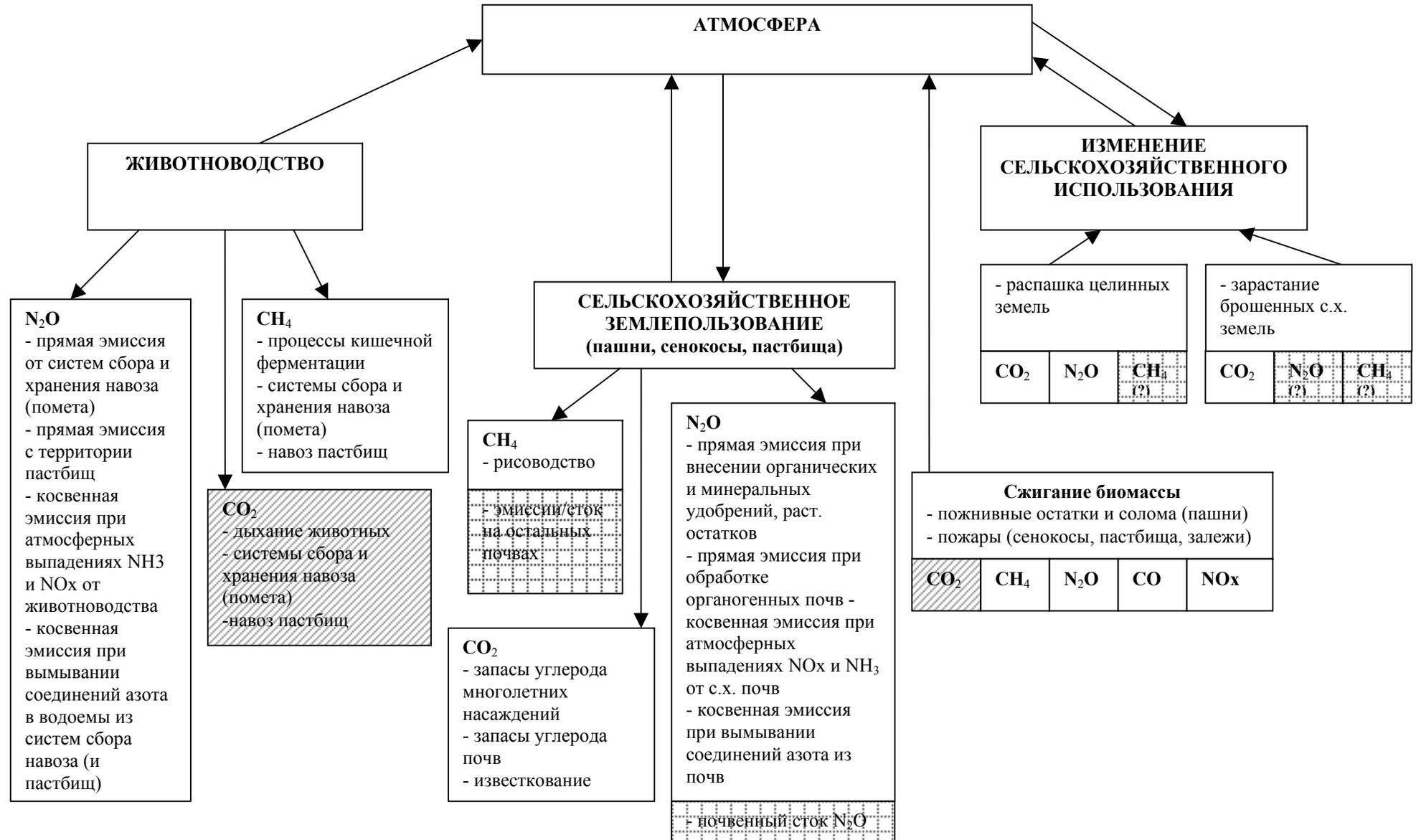


Рис. 1. Структура мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования: – категории источников (стоков) не оцениваются при мониторинге; - категории, по которым нет достаточных данных для разработки методологии.

Для проверки качества данных моделирования запасов почвенного органического углерода залежных земель в течение 2004-2007 г. были выполнены экспериментальные исследования на территории разных растительных зон России, включая зону северной тайги (болотные низинные почвы, Мурманская область), смешанных и широколиственных лесов Европейской части РФ и Урала (серые лесные и дерново-подзолистые суглинистые и супесчаные почвы Московской области; черноземы оподзоленные и подзолистые среднесуглинистые почвы Свердловской области) и степную зону (черноземы слитые, черноземы предкавказские легкосуглинистые и темно-каштановые почвы, слабозасоленные, среднесуглинистые Ставропольского края). Всего выбрано 80 пробных площадок на территории 17 районов. В каждом районе отбор почвенных проб производился на пашне, залежах трех возрастов (до 5 лет, 8-12 лет и 15-20 лет) и целине (лесной биоценоз не младше 50 лет). На пробных площадях из 10 почвенных образцов для каждого слоя от 0 до 20 см отбирались средние пробы. Также отобраны пробы с целью расчета объемной массы почв и определения продуктивности биомассы на залежах разного возраста. Содержание общего углерода почв в пробах по Мурманской области определяли методом сухого сжигания с использованием экспресс-анализатора «АН-7529» с кулонометрическим окончанием на базе лаборатории почвенного факультета МГУ. Содержание общего углерода остальных образцов почв определяли методом Тюрина в модификации Никитина в трех повторностях на базе лаборатории Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. На основании полученных данных рассчитывалось среднее содержание органического углерода и азота в слое почвы 0–20 см.

Для уточнения коэффициентов минерализации органического углерода, применяемых в модели RothC, исследовали изменение интенсивности дыхания почв залежных земель разного возраста на примере образцов Луховского и Дмитровского районов Московской области. Интенсивность дыхания почв определяли по скорости накопления CO_2 в сосудах при инкубации. Анализ газовых проб проводили на хроматографе Chrom 5 на базе лаборатории Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

Глава 3. ОБЩИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНОГО МОНИТОРИНГА ЭМИССИЙ И СТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В 70-80х годах прошлого столетия в СССР создана система фонового мониторинга (функционирующая и сейчас), которая включает наблюдения за приземным слоем атмосферы. Регулярные инструментальные оценки N_2O могут быть затруднены в связи с его низкой атмосферной концентрацией, в то время как CO_2 и CH_4 в системе фонового мониторинга измеряются с помощью соответствующего оборудования. Вместе с тем, полученные измерения на фоновых станциях не позволяют оценить реальное антропогенное воздействие на атмосферу, а показывают лишь общую концентрацию парниковых газов в данном месте, времени и при данных условиях. Учитывая, что атмосферные

концентрации основных парниковых газов помимо прочего формируются в результате биогеохимического циркулирования углерода и азота в системе растения – почва – атмосфера, оценка антропогенного вклада на фоне изменяющегося климата значительно усложняется.

Косвенный мониторинг эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения позволяет вычлнить степень антропогенного воздействия на атмосферу и, в конечном счете, на климат. Учитывая многообразие типов источников и поглотителей парниковых газов в сельскохозяйственных и лесных экосистемах, животноводстве, промышленности, энергетике и других сферах деятельности человека, для проведения косвенного мониторинга эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения целесообразным является выбор расчетного метода. В соответствии с этим методом потоки парниковых газов рассчитываются на основе показателей объема производства, добычи или любой другой количественной информации по выполняемой антропогенной деятельности (данные о деятельности). Расчетный метод позволяет наиболее точно и экономически эффективно определить количество парниковых газов антропогенного происхождения при оценках на любом уровне (импактном, региональном, национальном и глобальном уровнях).

Классическая схема системы мониторинга (Израэль, 1984), может быть использована (с некоторыми изменениями) в приложении к *расчетному* (косвенному) *мониторингу эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения* (см. рис. 2). Наблюдение включает предварительный поиск и выявление основных (или всех) источников и поглотителей, которые приводят к эмиссии или поглощению того или иного парникового газа в результате антропогенной деятельности, а также сбор данных о деятельности человека относительно данного источника. Расчет объемов эмиссий и поглощения парниковых газов подразумевает предварительную научную деятельность по разработке и внедрению методологий количественной оценки эмиссии (или поглощения) парникового газа. Полученные результаты мониторинга на данном этапе могут быть использованы для оценки антропогенного вклада в фактическое содержание парниковых газов в атмосфере (блок 3).

Сравнение с данными фонового мониторинга парниковых газов позволит оценить фактическое состояние атмосферы с учетом соотношений парниковых газов антропогенного и естественного происхождения, которые могут использоваться для получения климатической информации и для подготовки прогнозов погоды. Расчетный мониторинг может быть также использован для получения прогнозных оценок антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов и их вклада в изменение климата.

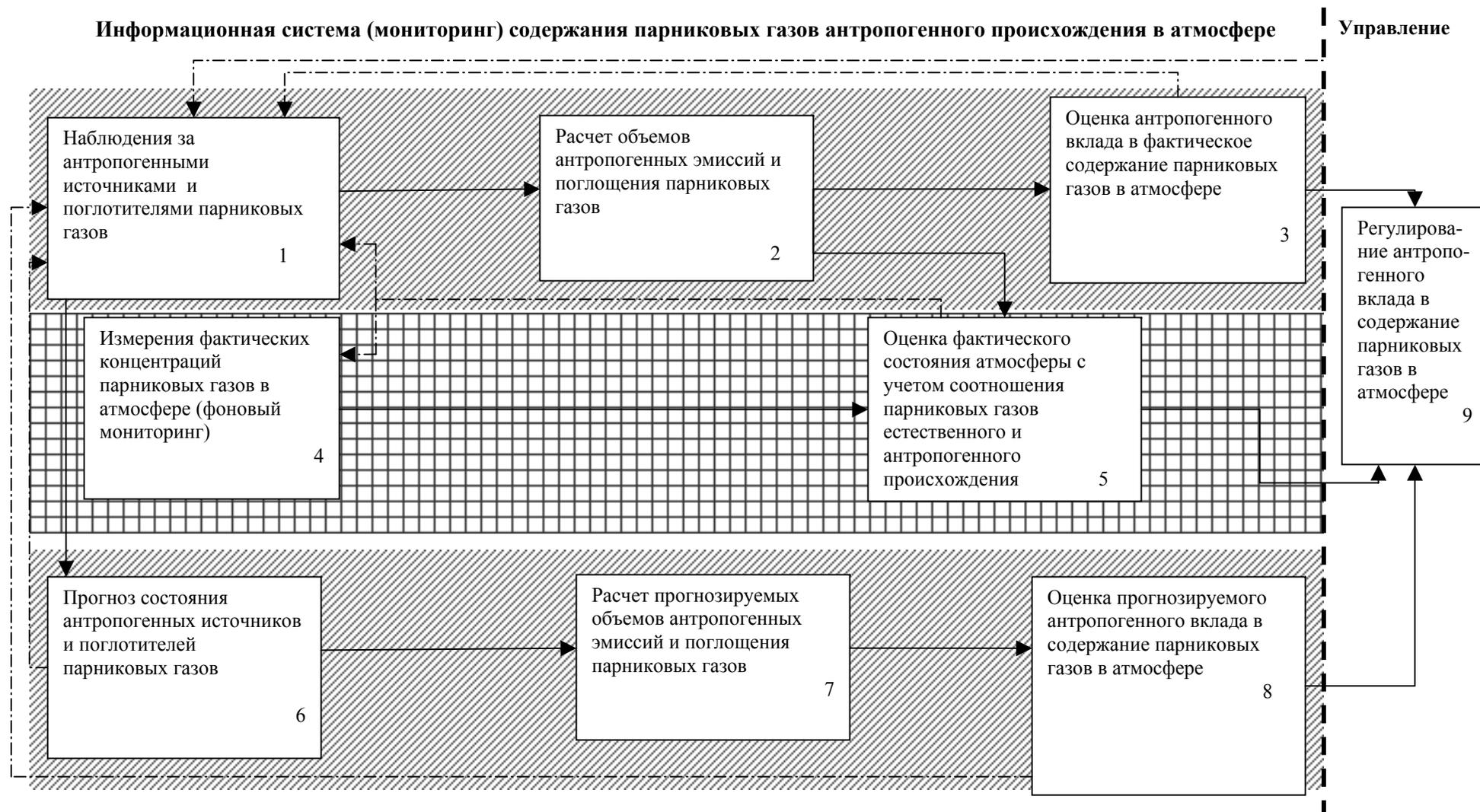


Рис. 2 Информационная система (мониторинг) содержания парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере, где
 // - расчетный мониторинг антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов;
 □□ - фоновый мониторинг парниковых газов

Расчетный мониторинг антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов является многофункциональной информационной системой и может быть использован при решении ряда экологических задач. Система может быть применена в качестве инструментальной базы при оценке экологической эффективности мер по снижению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов. При этом эффект должен рассматриваться в совокупности по всем парниковым газам и наиболее опасным загрязняющим веществам. Экономическая эффективность мер должна оцениваться оптимальным решением в системе «затраты – экологическая выгода – эффективность производства». Расчетный мониторинг антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов включает наблюдения (с использованием моделирования) за интегральными показателями экосистем и может использоваться в части экологического мониторинга (например, изменение баланса почвенного углерода агроэкосистем). Связь расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов со спутниковым мониторингом может дополнительно расширить возможности применения данной информационной системы.

Глава 4. МЕТОДЫ РАСЧЕТНОГО МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ И СТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И ПРИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ. АПРОБАЦИЯ РЕКОМЕНДУЕМЫХ МЕТОДИК

Мониторинг эмиссии метана при кишечной ферментации сельскохозяйственных животных

Уточненную методологию расчета коэффициентов удельной эмиссии CH_4 (EF) разрабатывали для категорий животных с наибольшим вкладом в эмиссию от кишечной ферментации: коровы и другое поголовье крупного рогатого скота (КРС). Эта методология позволяет рассчитывать потребление валовой энергии кормов животными, на основе соотношения видов кормов в годовом рационе скота и статистических данных по суммарному расходу кормов на 1 голову коров и другого поголовья КРС (Романовская, 2008). EF рассчитывают по уравнению (2) (IPCC, 2006):

$$GE = \sum_i (R \cdot (fod_i / totalfod) \cdot FU_i \cdot 18,4) \quad (1)$$

$$EF = (GE \cdot Ym) / 55,65 \text{ МДж/кг } CH_4 \quad (2)$$

где GE – валовая энергия потребляемого корма в расчете на 1 голову в год, МДж; R – суммарный расход всех видов кормов в расчете на 1 голову в год, кормовые единицы; fod_i – расход кормов определенного вида (i) на все поголовье коров (или другого КРС) за год, кормовых единиц; $totalfod$ – общее потребление кормов всех видов поголовьем коров (или другими КРС) за год, кормовых единиц; FU_i – содержание кормовых единиц в 1 кг сухого вещества корма определенного вида (i); Ym – коэффициент преобразования валовой энергии в CH_4 в кишечном тракте КРС, 0,06 (GPG, 2000); 18,4 – коэффициент преобразования сух. в-ва корма в МДж (GPG, 2000).

Перевод потребления энергии из кормовых единиц в МДж осуществлялся на основании анализа данных литературы и разработки среднего содержания кормовых единиц в килограмме сухого вещества (FU_i) для разных видов кормов ($1,13 \pm 0,27$ для концентратов, $0,98 \pm 0,35$ для комбикормов, $0,55 \pm 0,14$ для грубых кормов, $0,81 \pm 0,18$ для сочных кормов и $0,84 \pm 0,13$ для других видов кормов). При этом количество отдельных кормов разных видов, проанализированных при получении средних коэффициентов, достигло 443 для рациона крупного рогатого скота (Кормовые нормы..., 1991). Примеры рассчитанных коэффициентов эмиссии CH_4 для лет периода 1990-2005 приведены в таблице 1.

Табл. 1

Коэффициенты удельной эмиссии CH_4 от внутренней ферментации и систем сбора и хранения навоза, коэффициенты экскреции азота крупного рогатого скота (КРС) и свиней (Романовская, 2007; 2008)

Годы	Внутренняя ферментация кг CH_4 (гол. в год)		Системы сбора и хранения навоза кг CH_4 / кг N (гол. в год)		
	Коровы	Другое поголовье КРС	Коровы	Другое поголовье КРС	Свиньи
1990	100,7	48,2	4,8 / 92,3	2,6 / 51,7	3,0 / 19,8
1991	98,9	48,4	4,7 / 90,1	2,6 / 51,5	3,1 / 19,7
1992	92,7	46,3	4,4 / 83,6	2,5 / 48,8	3,0 / 18,8
1993	92,0	46,0	4,3 / 82,8	2,5 / 48,3	3,2 / 19,6
1994	90,4	46,9	4,3 / 80,7	2,5 / 49,0	3,3 / 19,4
1995	90,8	48,6	4,3 / 81,0	2,6 / 50,8	3,4 / 19,8
1996	88,8	47,3	4,2 / 79,6	2,5 / 49,5	3,3 / 18,9
1997	91,6	47,9	4,4 / 81,9	2,6 / 50,0	3,5 / 19,9
1998	91,4	47,6	4,4 / 81,7	2,5 / 49,5	3,8 / 21,3
1999	89,1	45,3	4,2 / 80,7	2,4 / 47,7	3,8 / 21,8
2000	92,0	46,2	4,4 / 83,7	2,4 / 48,8	3,5 / 20,1
2001	97,1	49,0	4,6 / 88,2	2,6 / 51,7	3,9 / 22,0
2002	97,1	49,6	4,6 / 88,1	2,6 / 52,5	3,8 / 22,0
2003	96,4	49,0	4,6 / 87,6	2,6 / 52,0	3,9 / 22,2
2004	98,2	50,4	4,7 / 89,6	2,6 / 53,6	3,9 / 22,4
2005	99,2	51,1	4,7 / 90,9	2,7 / 54,6	3,9 / 22,8
Среднее	94,1 \pm 3,9	48,0 \pm 1,6	4,5 \pm 0,2 / 85,2 \pm 4,3	2,6 \pm 0,1 / 50,6 \pm 2,0	3,5 \pm 0,3 / 20,7 \pm 1,4

Для остальных видов животных могут быть использованы коэффициенты, рекомендуемые МГЭИК (IPCC, 1997). При отсутствии коэффициентов для некоторых видов сельскохозяйственных животных (северные олени, кролики, пушные звери) в методике МГЭИК, мы проводили анализ доступной литературы и поиск соответствующих коэффициентов.

Сравнение полученных коэффициентов эмиссии от внутренней ферментации коров в течение периода с 1990 по 2005г. с коэффициентами, используемыми для коров в развитых странах Европы и коэффициентом, рекомендуемым МГЭИК (81 кг CH_4 /гол. в год при удоях 2500 кг/год) (GPG, 2000), свидетельствует о том, что в России при сравнительно низких надоях

молока коэффициенты выброса CH_4 достаточно высокие. Это может объясняться более высоким процентом потребления грубого корма в годовом рационе коров, который может снижать отношение обменной энергии к валовой и, соответственно, увеличивать потери с CH_4 . В течение последних лет с 2001г. наметилась тенденция увеличения эффективности использования энергии корма на образование продукции. Это может быть связано с улучшениями условий содержания скота и сокращением доли яловых коров в общем поголовье молочного скота.

Достоинством разработанной методики расчета уточненных коэффициентов удельной эмиссии CH_4 для КРС является зависимость величины коэффициента от состава и норм годовых рационов животных, что позволяет, в свою очередь, учитывать любую смену рациона при мониторинге парниковых газов в животноводстве, а также оценивать наиболее выгодные с точки зрения получения максимальной продуктивности и минимального выброса CH_4 рационы скота.

Апробация разработанной методологии и полученных коэффициентов эмиссии CH_4 была проведена при составлении Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в 2005 году. Согласно расчетам к 2005г. общая антропогенная эмиссия CH_4 от кишечной ферментации снизилась до 40% уровня 1990г. (рис. 3) в связи с резким уменьшением поголовья животных и птицы в результате спада производства в агропромышленном комплексе.

Мониторинг эмиссий метана и закиси азота в системах сбора и хранения навоза и помета сельскохозяйственных животных

Существенный вклад в общую эмиссию CH_4 и N_2O от систем сбора и хранения навоза (помета) вносят отходы свиноводческих ферм и КРС (Romanovskaya, 2006). Поэтому уточнение величины эмиссии необходимо проводить, прежде всего, для этих видов животных. Основой для расчета является определение количества сухого органического вещества и азота, которые продуцируются животными с навозом за год.

Валовая энергия корма свиней может быть рассчитана по аналогичной методике, как и для КРС (формула 1). Коэффициенты содержания кормовых единиц в килограмме сух. в-ва: $1,2 \pm 0,3$ для концентратов; $1,1 \pm 0,2$ для комбикормов, $0,6 \pm 0,1$ для грубых кормов, $0,9 \pm 0,2\%$ – сочные корма и $0,7 \pm 0,5$ для животных кормов, а также коэффициенты перевариваемости разных видов кормов и содержания в них белка для свиней рассчитали отдельно. При этом было проанализировано 317 видов отдельных кормов для свиней (Кормовые нормы..., 1991). Также определили основные типы систем сбора и хранения навоза домашних животных и их соотношение (табл. 2).

Расчет коэффициентов эмиссии CH_4 от систем сбора и хранения навоза КРС и свиней выполняют по усовершенствованным нами уравнениям МГЭИК 3 и 4 (Dong et al., 2006):

$$VS = (GE \cdot (1 - DE\%/100) + UE \cdot GE) \cdot (1 - ASH)/18,4 \quad (3)$$

$$EF_{MMS} = VS \cdot Bo \cdot 0,67 \text{ кг/м}^3 \cdot \sum_j (MCF_j/100 \cdot MS_j) \quad (4)$$

где VS – выделение сухого органического вещества, кг/год; DE – коэффициент перевариваемости корма, %; UE – энергия мочи, фракция валовой энергии ($0,04 \pm 0,01$ для КРС и $0,02 \pm 0,01$ для свиней) (IPCC, 2006); ASH – содержание золы в сухом веществе навоза ($8,0 \pm 2,4\%$) (GPG, 2000); EF_{MMS} – коэффициент эмиссии CH_4 от систем сбора и хранения навоза, кг CH_4 /гол. в год; Bo – максимальный потенциал выброса CH_4 от навоза ($0,24 \pm 0,04$; $0,17 \pm 0,03$ и $0,45 \pm 0,07$ для навоза коров, другого поголовья КРС и свиней соответственно), $m^3 CH_4 / kg VS$ (IPCC, 2006); MCF – коэффициенты пересчета CH_4 для разных типов систем хранения навоза (жидкие системы – $20,0 (-2,0/+5,0)\%$, в твердом виде – $2,0 (-0,1/+0,6)\%$ и пастбищное содержание – $1,0 (\pm 0,1)\%$), процент; MS – фракция навоза КРС (свиней), содержащаяся в определенной системе сбора и хранения, доля ($\pm 10,0\%$) (см. табл. 2).

Табл. 2.

Соотношение основных типов систем сбора и хранения навоза и помета для разных категорий сельскохозяйственных животных и птицы (на примере 2005г.), %
(Романовская, 2008)

Категория сельскохозяйственных животных и птицы	Тип системы хранения навоза (помета)		
	Жидкостные	В твердом виде	Пастбища и выпасы
Коровы	0,0	77,3	22,7
Другое поголовье КРС	5,6	67,0	27,4
Птица	0,0	93,5	6,5
Овцы, козы, лошади, верблюды, мулы, ослы, северные олени*	0,0	81,6	18,4
Свиньи	23,9	76,1	0,0
Кролики, пушные звери (лисы, песцы, норки)	0,0	100	0,0
Нутрии	100	0,0	0,0

* по данным (Гитарский и др., 2001)

Коэффициенты перевариваемости (DE) разных видов кормов у КРС определены как средние величины по справочным данным: концентраты – $80,3 \pm 5,0\%$, комбикорма – $84,4 \pm 2,5\%$, грубые корма – $61,7 \pm 5,1\%$, сочные корма – $66,3 \pm 8,9\%$ и пастбищные – $66,1 \pm 5,3\%$. Для свиней: $75,2 \pm 7,8\%$ для концентратов; $77,0 \pm 6,4\%$ для комбикормов, $40,3 \pm 7,1\%$ для грубых кормов, $48,4 \pm 16,3\%$ – сочные корма и $90,8 \pm 3,4\%$ для животных кормов. Средневзвешенные значения коэффициентов перевариваемости кормов определяют в зависимости от соотношения разных видов кормов для каждого года. Значения коэффициентов пересчета CH_4 ($MCFs$) от разных систем сбора и хранения были взяты из данных литературы. Результаты расчета коэффициентов эмиссии CH_4 приведены в табл. 1. Полученные уточненные коэффициенты эмиссии CH_4 от навоза КРС и свиней ниже коэффициентов эмиссии, используемых в странах Европы, что объясняется преобладанием в России систем хранения навоза в твердом виде, которые характеризуются слабыми выбросами CH_4 , по сравнению с анаэробными и жидкими системами хранения, распространенными в западных странах.

Коэффициенты эмиссии CH_4 от систем сбора и хранения навоза и помета остальных видов сельскохозяйственных животных могут быть взяты из руководства МГЭИК (IPCC, 2006), а для северных оленей, разных подкатегорий птицы, пушных зверей и кроликов из материалов обзора литературы (NIR Norway, 2005; USDA Agricultural..., 1996; Hill, 1982; 1984; ASAE Standards..., 1999). Результаты апробации методики мониторинга эмиссий CH_4 от систем сбора и хранения навоза на национальном уровне приведены на рисунке 3.

Экскрецию азота коровами, другим поголовьем КРС и свиньями в год нами предложено оценивать по уравнению 5 с использованием уравнения 6 (GPG, 2000). Результаты расчетов приведены в таблице 1.

$$N_{\text{INTAKE}} = GE/18,4 \cdot (CP\%/100)/6,25, \quad (5)$$

$$N_{\text{EX}} = N_{\text{INTAKE}} \cdot (1 - N_{\text{RETENTION}}), \quad (6)$$

где N_{INTAKE} – годовое поглощение азота с кормом, кг; $CP\%$ – содержание сырого протеина в корме, %; N_{EX} – количество экскретируемого азота, кг/гол. в год; $N_{\text{RETENTION}}$ – фракция удерживаемого азота в теле животного, доля.

Фракции $N_{\text{RETENTION}}$ могут быть взяты из (GPG, 2000). Средние значения $CP\%$ для разных видов кормов КРС и свиней определены по справочным данным (Кормовые нормы..., 1991). КРС: $12,3 \pm 3,6\%$ – сочные корма, $13,8 \pm 5,1\%$ – грубые, $11,6 \pm 4,4\%$ – концентраты, $23,6 \pm 12,5\%$ – комбикорма и $16,1 \pm 4,9\%$ для пастбищных кормов. Для свиней – $13,8 \pm 5,0\%$, $13,8 \pm 5,1\%$, $23,5 \pm 12,3\%$, $31,1 \pm 8,5\%$, соответственно, и $41,7 \pm 18,7\%$ для животных кормов. Средневзвешенные значения $CP\%$ определяют для каждого года отдельно в зависимости от соотношения разных видов кормов.

Годовые потоки азота с пометом от подкатегорий птицы определялись по нормативным документам (ОНТП 17-81, 1983). Величины экскретируемого азота за год северными оленями, кроликами и пушными зверями определены на основании анализа данных инвентаризаций стран Европы (NIR Sweden, 2005; NIR Italy, 2005; NIR Denmark, 2005). Для остальных видов животных может быть использован коэффициент экскреции азота, рекомендуемый в (GPG, 2000).

Общая прямая эмиссия N_2O ($N_2\text{O}_d$) от систем сбора и хранения навоза рассчитывается по уравнению (GPG, 2000):

$$N_2\text{O}_d = (\sum_s [\sum_i (N_i \cdot Nex_i \cdot MS_{is})] \cdot EF_{3si}) \cdot 44/28 \quad (7)$$

где N_i – поголовье скота (птицы) определенной категории (i), тыс. голов; EF_{3si} – коэффициент эмиссии N_2O от соответствующей системы сбора и хранения, кг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}/\text{кг N}$.

При оценке эмиссии N_2O от систем сбора и хранения навоза (помета) учитывали также вторичную или косвенную эмиссию N_2O . Атмосферные выпадения NH_3 и NO_x , поступившие в атмосферу из навоза (помета), могут подвергаться процессам нитрификации и денитрификации в почвах, и, соответственно, обуславливать косвенную эмиссию N_2O . Кроме того, косвенная эмиссия N_2O происходит при вымывании соединений азота из открытых систем хранения навоза и с пастбищ в водоемы. Выбросы NH_3 и NO_x

и количество вымытого азота от систем сбора и хранения навоза предложено нами рассчитывать по уравнению 7, используя соответствующие пересчетные коэффициенты EF_3 . Коэффициенты потерь азота с эмиссиями NH_3 и NO_x из разных систем сбора и хранения навоза получены по данным литературы (Hutchings et al., 2001; Rotz, 2004; USA EPA, 2004) и представлены в таблице 3. Фракция вымываемого азота при хранении в твердом виде составляет около 3 (0-10)% экскретируемого азота, а на пастбищах достигает 20 (5-35)% (Hutchings et al., 2001; Rotz, 2004; USA EPA, 2004).

Табл. 3

Коэффициенты эмиссии NH_3 и NO_x из систем сбора и хранения навоза, % общего N в системе хранения (Романовская, 2007)

Категории сельскохозяйственных животных и птицы	Хранение в жидком виде	Хранение в твердом виде	Пастбища и выпасы
Коровы	---	40,0 (10-65)	10,0 (5-20)
КРС (без коров)	40,0 (15-45)	45,0 (20-70)	10,0 (5-20)
Свиньи	48,0 (15-60)	45,0 (15-65)	---
Птица	---	40,0 (20-70)	10,0 (5-20)
Северные олени, лошади, верблюды	---	28,0 (10-40)	10,0 (5-20)
Овцы	---	28,0 (10-40)	7,0 (2-10)
Козы, ослы и мулы	---	25,0 (10-30)	7,0 (2-10)
Кролики и пушные звери (лисы, песцы, норки)	---	12,0 (5-20)	---
Нутрии	30,0 (10-35)	---	---

Общую косвенную эмиссию N_2O от систем сбора и хранения навоза предлагается оценивать по уравнению 8:

$$N_2O_{ind} = (N_{ATM} \cdot 0,01 + N_{LEACH} \cdot 0,025) \cdot 44/28 \quad (8)$$

где N_2O_{ind} - косвенная эмиссия N_2O от азота атмосферных выпадений (N_{ATM}) и вымытого азота (N_{LEACH}) от систем сбора и хранения навоза и помета, включая пастбища, кг N- N_2O .

Результаты апробации приведенной выше методологии представлены на рисунке 4. Около 83% прямой эмиссии образуется при хранении навоза и помета в твердом виде, вклад навоза пастбищ составляет в среднем 17%. Доля косвенных выбросов в суммарной эмиссии составляет около 26%. В 2005г. общая эмиссия N_2O в животноводстве России снизилась на 60% от уровня 1990г., что связано с сокращением поголовья животных.

Мониторинг эмиссии закиси азота от пахотных почв

Оценка прямой эмиссии N_2O от пахотных земель в России проводится согласно разработанной методике:

$$N_2O_{DIRECT} = (\sum_i (F_{Sni} \cdot EF_i) + [(F_{AM} + F_{BED} + F_{ON} + F_{CR}) \cdot EF_1] + (F_{OS} \cdot EF_2)) \cdot 44/28 \quad (9)$$

где N_2O_{DIRECT} - прямая эмиссия N_2O , кг/год; F_{Sni} - внесение азота с минеральными удобрениями в почву определенного типа (i), кг N/год; EF_i - коэффициент эмиссии N_2O от азота минеральных удобрений на почве

определенного типа (i), кг N-N₂O/кг N (см. табл. 4); F_{AM} – внесение азота с навозом (пометом), кг N/год; F_{BED} – количество азота в подстиле сельскохозяйственных животных, вносимого в почву с органическими удобрениями, кг N/год; F_{ON} – количество азота в иных видах органических удобрений (сидераты, торф), кг N/год; F_{CR} – количество азота растительных (пожнивных и корневых) остатков, поступающее в почву, кг N/год; F_{OS} – площадь культивируемых органогенных (торфяных и торфянистых) почв, га; EF_1 – коэффициент эмиссии N₂O из азота органических удобрений и растительных остатков, 0,0125 (-80/+380%) кг N-N₂O/кг внесенного N (IPCC, 1997), EF_2 – коэффициент эмиссии при культивации органических почв, 8,0 (-88/+900%) кг N-N₂O/га в год (GPG, 2000).

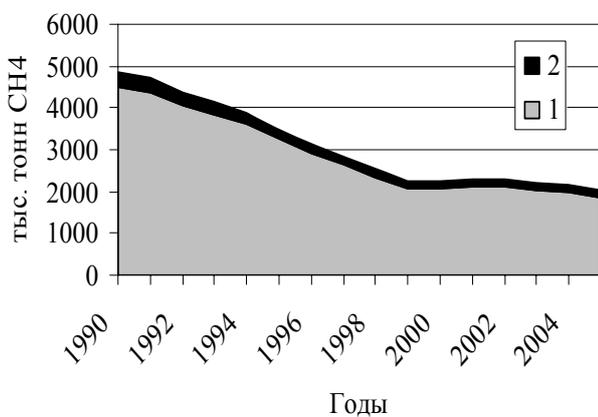


Рис. 3 Эмиссия CH₄ от кишечной ферментации и систем сбора и хранения навоза (помета) в России в течение периода с 1990 по 2005 г.: 1- кишечная ферментация; 2- системы сбора и хранения навоза.

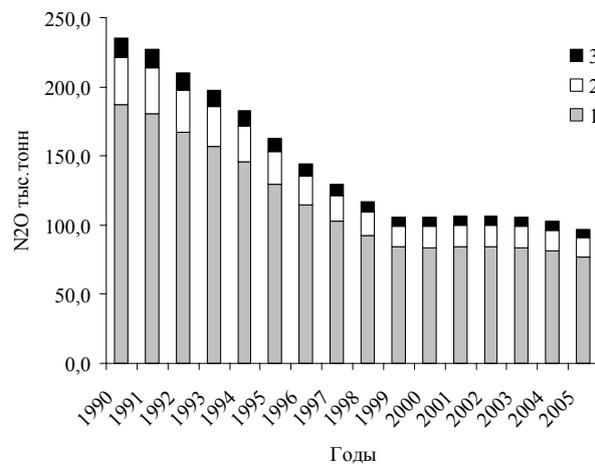


Рис. 4 Эмиссия N₂O в животноводстве России за период с 1990 по 2005 г., где: 1- прямая эмиссия N₂O от систем сбора и хранения навоза и пастбищ, 2- косвенная эмиссия N₂O от атмосферных выбросов NH₃ и NO_x из навоза, 3- косвенная эмиссия N₂O при вымывании соединений азота из навоза.

Расчет прямой эмиссии закиси азота от внесенных азотных удобрений на черноземах и дерново-подзолистых почвах выполняется с использованием уточненных коэффициентов EF_i (-95/+150%) (Romanovskaya et al., 2002), приведенных в таблице 4.

Табл. 4

Коэффициенты эмиссии N₂O от минеральных азотных удобрений (EF_i)

Дозы удобрений, кг N/га	Черноземы	Дерново-подзолистые почвы	Другие типы почв
40-75	0,0126	0,0238	0,0125 ¹
160-265	0,006	0,012	

¹ коэффициент, рекомендованный МГЭИК (IPCC, 1997).

Рекомендуемые для России пересчетные коэффициенты для черноземов, дерново-подзолистых и других типов пахотных почв в таблице 4 выделены курсивом. Коэффициенты, разработанные для высоких доз внесения минеральных удобрений, могут быть использованы для выборочных расчетов в фермерских хозяйствах.

Внесение азота из систем сбора хранения навоза нами предложено оценивать на основании данных об общем количестве экскретируемого азота (N_{ex_i}) с последующей корректировкой этого количества с учетом потерь азота при хранении с N_2O , NH_3 и NO_x и при вымывании (N_{2Od} , N_{ATM} и N_{LEACH}); с учетом навоза, который сжигается в качестве топлива ($Frac_{FUEL-AM}$); а также азота навоза, который остается на поверхности земли в результате выпаса скота ($Frac_{PRP}$).

$$F_{AM} = ([\sum_i (N_i \cdot Nex_i)] - 28/44N_{2Od} - N_{ATM} - N_{LEACH}) \cdot [1 - (Frac_{FUEL-AM} + Frac_{PRP})] \quad (10)$$

Доля азота навоза ($Frac_{FUEL-AM}$), использованного в качестве топлива, как правило, в России равна нулю. $Frac_{PRP}$ приведена выше в таблице 2.

Расчет азота, вносимого в почвы с органическим подстилом (солома, опилки) из-под сельскохозяйственных животных (КРС, свиньи, овцы, лошади, ослы и мулы), предлагается проводить по уравнению:

$$F_{BED} = (N_i \cdot Frac_{bed} \cdot NC_{bed}) \cdot 365 / 1000 \quad (11)$$

где $Frac_{bed}$ – доля поголовья сельскохозяйственных животных каждой категории (i), которая содержится в стойлах с применением органического подстила; NC_{bed} – среднее содержание азота в подстиле животных определенной категории, г N/голову/день (приведено в табл. 23 диссертации).

Как правило, солома применяется в качестве подстила для домашних животных только в мелких фермерских хозяйствах и в подсобных хозяйствах граждан, там же где применяют хранение навоза в твердом виде. Период содержания животных на подстилке может быть разным и составлять весь год или только часть года. В последнем случае количество дней в уравнении 11 должно быть соответственно сокращено. Для России в среднем длительность стойлового содержания животных можно принять равной около 300 дней.

Количество азота в иных видах органических удобрений (сидераты, торф) (F_{ON}) определяется на основании общего внесения этих удобрений и полученным коэффициентам среднего содержания в них азота: торф – $1,51 \pm 0,56\%$ N в сыром веществе; сидераты – $1,91 \pm 0,75\%$ N в сыром веществе и остальные виды удобрений – $0,35 \pm 0,17\%$ N.

Запахивание оставленных на полях пожнивных и корневых остатков сельскохозяйственных культур рассматривается как один из основных антропогенных источников атмосферной эмиссии N_2O в России (Романовская, 2008). Количество азота растительных остатков (F_{CR}), поступающего в пахотные почвы, оценивалось в соответствии с разработанной национальной методикой (Романовская и др., 2002) на основе анализа данных литературы по оценке баланса питательных веществ в севооборотах (Левин, 1977; 1983; Ломако, 1992a; 1992b; Унежев, 1996; Чупрова, 1997). Ниже представлен общий вид разработанных нами уравнений:

$$F_{CR} = Ab/100 + (Un \cdot 1,2)/100 \quad (12)$$

$$Ab \text{ или } Un = \sum_i ((a_i P_i + b_i) \cdot N_i) \cdot S_i \quad (13)$$

где Ab – масса азота, поступающего в почву при разложении поверхностных (Un – корневых) остатков растений, ц N; P_i – урожайность основной продукции культуры определенного вида (i), ц сух. в-ва/га; a_i и b_i – соответствующие коэффициенты для расчета массы поверхностных (корневых) остатков данной сельскохозяйственной культуры при определенном уровне урожайности (Левин, 1983); N_i – содержание азота в поверхностных (корневых) остатках данной культуры, кг N/кг сух. массы (Левин, 1977); S_i – посевная площадь данного вида растений, га.

Методы определения массы корней путем механического отбора или отмывания водой могут давать заниженные результаты. Так, результаты опытов с ^{14}C показывают, что общее количество фотосинтетически связанного углерода, поступившее в почву в процессе роста растения, на 20-25% превышает содержание углерода в корневой массе (Кононова, 1984). Очевидно, что примерно такое же занижение на 20-25% возможно и при расчете азота корней культурных растений. Поэтому в уравнении 12 для азота корневых остатков введен пересчетный коэффициент 1,2.

Учитывая, что ежегодные статистические данные по площадям обрабатываемых органогенных почв в стране отсутствует, предложено определять величину F_{OS} расчетным путем на основании общей ежегодной культивируемой площади в стране (сумма пашни, пара и многолетних насаждений) и доле торфянистых и торфяных почв в сельскохозяйственных угодьях России – 1,5 (1,0 – 2,0)% (Распределение земельного фонда..., 1980).

При резком снижении объемов вносимых минеральных удобрений и сокращении поголовья сельскохозяйственных животных минерализация растительных (пожнивных и корневых) остатков обуславливает от 40 (в 1990 г.) до 70% (в 2005 г.) ежегодного поступления антропогенного азота в пахотные земли (рис. 5).

При расчете общей эмиссии N_2O в аграрном секторе России учитывают также косвенную эмиссию при вымывании и выносе азота с полей (N_2O_L) и атмосферных выпадениях азотсодержащих веществ (N_2O_G) – NO_x и NH_3 . Расчет N_2O_G производят на основе величин F_{SN} и F_{AM} , и фракциям потерь азота в виде N_2O – 0,1 (0,07-2,0) и 0,2 (0,14-0,4) кг N- NH_3 , N- NO_x /кг N удобрений соответственно (GPG, 2000). Коэффициент эмиссии N_2O в результате атмосферных выпадений (EF_4) составляет 0,01 ($\pm 50\%$) кг N- N_2O /кг N эмиссий NH_3 и NO_x (GPG, 2000). Косвенную эмиссию N_2O при вымывании соединений азота с полей нами предложено рассчитывать на основе величин F_{SN} , F_{AM} , F_{ON} , F_{BED} , а также азота растительных остатков (F_{CR}):

$$\text{N}_2\text{O}_L = (F_{SN} + F_{AM} + F_{BED} + F_{ON} + F_{CR}) \cdot \text{Frac}_{LEACH} \cdot EF_5 \quad (14)$$

где Frac_{LEACH} – доля, вносимого азота, который выносится в результате выщелачивания и смыва, 30% (10-80%) (GPG, 2000); EF_5 – коэффициент эмиссии N_2O в результате вымывания и смыва азота из почв с поверхностными или внутрпочвенными водами, 0,025 ($\pm 50\%$) кг N- N_2O /кг N (GPG, 2000).

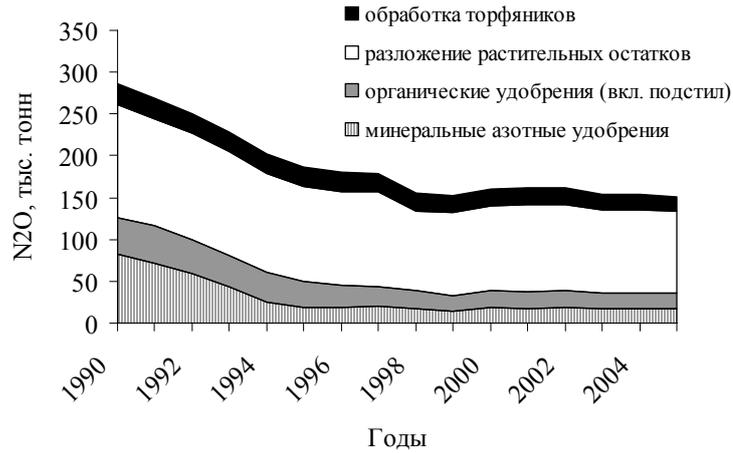


Рис. 5 Прямая эмиссия N₂O от сельскохозяйственных земель РФ за период 1990-2005 гг.

Результаты апробации методологий на национальном уровне показывают, что косвенная эмиссия N₂O от пахотных почв сократилась за рассматриваемый период на 50% в связи с сокращением внесения в почвы минеральных и органических удобрений, уменьшением площадей посевных земель в стране. Вклад эмиссии при вымывании соединений азота составляет в среднем 90% от общей величины косвенной эмиссии N₂O.

Мониторинг потоков углекислого газа на пахотных почвах

Расчет ежегодного изменения запасов почвенного углерода в пахотных землях выполняют на основе разработанной нами однокомпонентной модели, основанной на балансовой оценке потоков углерода, поступающих в почвы и выносимых из них. При этом внесение органических (C_{ORG}) и минеральных (C_{MIN}) углеродсодержащих удобрений, известкование почв (C_{lime}) и фотосинтез произрастающих на этих землях культурных растений (C_{BIO}), рассматриваются как статьи прихода (поступления) углерода в почву. Для расчета выноса углерода с пахотных земель оценивают механические потери углерода почв с эрозией и дефляцией ($C_{Erosion}$), вынос углерода с биомассой надземной части культурных растений при уборке урожая (C_{HARV}), а также при дыхании почв (C_{RES}).

$$C_{BAL} = (C_{ORG} + C_{MIN} + C_{lime} + C_{BIO}) - (C_{Erosion} + C_{HARV} + C_{RES}) \quad (15)$$

где C_{BAL} – годовой баланс почвенного органического углерода пашен, тыс. тонн C/год.

Для оценки содержания углерода в разных видах органических удобрений были использованы данные литературы. Согласно санитарным нормам навоз и помет требуют хранения в среднем около 6 месяцев перед их внесением в пахотные почвы для дезинфекции. Поэтому данные по содержанию углерода в свежем веществе разных видов навоза и помета были пересчитаны нами с учетом его средних потерь за время хранения (табл. 5).

Содержание углерода в сыром веществе разных видов органических удобрений, подготовленных к внесению в почвы

Вид органического удобрения	Среднее содержание углерода, % сырого вещества
Навоз	8,1 (±4,0)
-подстилочный	12,1(±1,8)
-бесподстилочный	4,1(±0,4)
Торф	23,6 (±6,6)
Помет	19,1(±5,7)
Солома, сидераты и др.	22,2(±5,6)

Оценку поступления углерода в пахотные земли с минеральными удобрениями (C_{MIN}) выполняют на основе статистической информации по общему количеству внесенных азотных, фосфорных и калийных удобрений и среднему содержанию углерода в них. Статистика приводится в пересчете на действующие вещества, поэтому коэффициенты по содержанию углерода в разных видах удобрений рассчитаны к соответствующим действующим веществам. Результаты расчетов коэффициентов приведены в таблице 6.

Табл. 6

Коэффициенты по содержанию углерода в разных видах минеральных удобрений

Вид удобрений	Среднее содержание действующего вещества, %	Среднее содержание углерода, %	Пересчетный коэффициент (углерод/ действ. в-во) (±50%)
азотные	29,2	3,7	0,13
фосфорные	24,8	0,4	0,015
калийные	31,2	0,5	0,017

Аналогично можно оценить поступление углерода в почвы с известковыми материалами (C_{lime}). Учитывая, что в известковых материалах содержится в среднем около 30% примесей и влаги (Шильников и др., 2006), предлагается использовать комбинированный коэффициент в применении ко всему объему известковых материалов, используемых в стране – 8,4 (±0,8)%.

Оценку фотосинтетического поступления углерода в агроэкосистемы рекомендуется выполнять хлорофилльным способом:

$$C_{BIO} = \sum_i (A_i \cdot (Hl_i \cdot P_i)) / 1000000 \quad (16)$$

где A_i – площадь под отдельным агроценозом или группой ценозов со сходными культурами, га; Hl_i – проективное содержание хлорофилла в данном ценозе, кг хлорофилла/га; P_i – продуктивность хлорофилла, кг связанного в биомассе С/кг хлорофилла.

Точность оценки первичной биологической продуктивности этим методом составляет 15-25%. Данные по проективному содержанию хлорофилла наиболее точно могут быть оценены методами дистанционного зондирования. Известно, что каждый килограмм хлорофилла обеспечивает в среднем за период вегетации связывание около 145 кг атмосферного углерода в фитомассе (Мокронос, 1999). Это соотношение может несколько варьировать в зависимости от видов растений. Поэтому нами разработаны данные по

продуктивности хлорофилла разных культурных экосистем (зерновые, пропашные, одно- и многолетние травы и др.), которые были определены по (Куренкова, 1998) (табл. 7). Рассчитанные средние величины проективного содержания хлорофилла, а также общее количество фотосинтетического связанного углерода могут быть использованы для крупномасштабных оценок стока углерода. По оценкам Заварзина Г.А. (Заварзин, 2001) в среднем для экосистем России проективное содержание хлорофилла составляет около 22 кг/га. Эта величина была использована для тех культурных биоценозов, для которых более специфичных данных не было обнаружено, например, для многолетних насаждений.

Табл. 7

Проективное содержание, продуктивность хлорофилла и связанный углерод в основных типах культурных экосистем

Культура	Проективное содержание хлорофилла*, кг/га	Продуктивность хлорофилла, кг С/кг хлорофилла	Фотосинтетически связанный углерод ($\pm 20\%$), т · га ⁻¹ · год ⁻¹
зерновые	20,7	197,0	4,1
технические	13,3	184,5	2,5
пропашные	15,5	215,0	3,3
однолетние травы	20,7	141,0	2,9
многолетние травы	17,0	140,0	2,4
зернобобовые	20,7	169,0	3,5
овощебахчевые	18,4	176,5	3,3
многолетние насаждения	22,0	145,0	3,2
среднее	18,5 \pm 3,0	171,0 \pm 27,7	3,2 \pm 0,6

* эти данные могут быть использованы при отсутствии более точных значений, полученных методами дистанционного зондирования для отдельных агроценозов

По данным (Титлянова и др., 1998), за последние 60-70 лет средние потери органического углерода сельскохозяйственных почв Сибири в результате эрозии и дефляции составили около 100 кг/га в год. Можно допустить, что эта величина близка к средним потерям углерода на пашнях и для других регионов России. Однако значительное количество эродированного материала переотлагается в понижениях или овражной зоне в пределах пахотных земель, что не должно учитываться в наших расчетах. В Европейской части России объем выноса органического вещества почв за пределы пашни в среднем составляет 11-17% от общей массы материала, перемещаемого плоскостным смывом. В регионах с интенсивной эрозией (Среднерусская, Калачская, Приволжская и Верхнекамская возвышенности), а также в степной зоне (Ставрополье) около 70-80% эродированного материала переотлагается в пределах пашни, а вынос в водотоки составляет 20-30% (Зорина, 2000; Любимов и др., 2000; Пацукевич, Козловская, 2000). Поэтому, используя величину потерь углерода в 100 кг/га, предложенную в (Титлянова и др., 1998), можно заключить, что только 20-30 кг углерода с одного гектара безвозвратно выносятся за пределы пахотных земель.

Для оценки качества этих данных был проведен расчет объема смыва органического вещества с одного гектара площади водосбора за 1991, 1992, 1993 и 1995 годы (Ежегодник качества поверхностных вод РФ, 1993; 1994; 1995). Для этого проанализированы площади водосборов и данные по содержанию органического вещества в водах рек Белого, Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Охотского, Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, бассейна Тихого океана и озера Байкал. Полученная величина смыва углерода в среднем по стране находилась в пределах 21 – 25 кг с гектара водосбора в начале 90х годов. Учитывая, что в последние годы проведение противоэрозионных мероприятий в сельском хозяйстве России сократилось, для расчетов выбрано максимальное значение потерь – 25 ($\pm 15\%$) кг/га. Это значение хорошо согласуется с данными исследователей, рассмотренными выше и может быть рекомендовано для расчетного мониторинга.

Вынос углерода биомассы культурных растений с территории пахотных земель при уборке урожая нами предложено рассчитывать как сумму потерь углерода с побочной продукцией (солома, ботва) и урожаем основной продукции (зерно, корнеплоды). Для расчетов выноса углерода с побочной продукцией использованы регрессионные уравнения Левина на основе данных урожайности основной продукции (Левин, 1977). Определение углерода, вынесенного с полей с урожаем основной продукции, выполняют на основании данных по валовому сбору и содержанию углерода в основной продукции или надземной части растений.

Дыхание почв складывается из дыхания корней и почвенной микрофлоры. Учитывая, что дыхание корней уже учтено нами при рассмотрении фотосинтетического связанного углерода, ассимилированного в растениях (чистая первичная продукция), необходимо было оценить потери углерода в форме CO_2 при разложении почвенного органического вещества (C_{RES}). Для этого были проанализированы данные литературы по экспериментальным оценкам дыхания разных типов почв под разными сельскохозяйственными культурами, измеренными в течение вегетационного периода. Собранные данные по интенсивности выделения CO_2 почвами были приведены к единым единицам измерения ($\text{мг CO}_2/\text{м}^2$ в час) и усреднены по основным типам почв. Полученные средние значения дыхания для черноземов составляют $402 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, по дерново-подзолистым – $340 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, среднее по остальным почвам (серые лесные, каштановые, лугово-черноземные) – $256 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, и по паровым почвам – $207 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ ($\pm 50\%$). Эти величины были использованы нами при разработке модели. Во избежание двойного учета корневого дыхания, мы условно приняли, что вклад корней в общее почвенное дыхание в агроценозах равен 40 ($\pm 10\%$), что согласуется с данными литературы (Кудеяров, Курганова, 2005). Для корректной оценки годового потока CO_2 необходимо также рассчитать величину дыхания почв вне вегетационного периода. По различным данным зимнее дыхание почв может составлять от 3-5 % до 47% годового потока (Кудеяров, Курганова, 2005; Сапронов, 2008). По оценке Заварзина на

территории нашей страны зимний поток углекислого газа при дыхании пахотных почв в среднем составляет около 10% от годового (Заварзин, 2001). Эта величина и была использована для оценки зимнего дыхания пахотных почв.

$$C_{RES} = \sum_{region} (\sum_{LU} (A_{regionLU} \cdot CO_{2LU}) \cdot VP_{region}) / 100000 \cdot 0,6 \cdot 1,1 \cdot 12/44 \quad (17)$$

где $A_{regionLU}$ – площадь посевов (или паров) в области (или экономическом районе), тыс. га; CO_{2LU} – средневзвешенный коэффициент эмиссии CO_2 для оценки дыхания разных типов почв под посевами (учитывая следующее соотношение ($\pm 15\%$): черноземов – 64,1%, дерново-подзолистых почв – 14,7% и остальные типы почв – 21,2%) или парами, мг $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$; VP_{region} – продолжительность вегетационного периода в каждой области (экономическом регионе), час (см. табл. 33 и 41 диссертации); 0,6; 1,1 и 12/44 – коэффициенты для вычета дыхания корней, учета зимнего дыхания и перевода данных из CO_2 в С, соответственно.

Составлен общий ежегодный баланс углерода на пахотных землях за период 1990-2005 гг. (см. рис. 6). Положительные величины показывают поступление углерода в агроценозы, а отрицательные – его потери. Общий годовой баланс углерода на пахотных землях России отрицательный в течение всего рассматриваемого периода (Романовская, Карабань, 2007). Фотосинтетический углерод является основным потоком, определяющим суммарное количество поступающего углерода в почвы пахотных земель. Ведущий вклад в суммарные потери углерода пахотных земель принадлежит дыханию почв и изъятию биомассы культурных растений при уборке урожая. Годовой нетто поток углерода из пахотных почв в атмосферу в расчете на один гектар представлен на рисунке 7. В среднем в течение 1990-1999 эмиссия CO_2 с территории пахотных почв составляла $226,1 \pm 60,3$ млн. тонн CO_2 , а в 2000-2005г. увеличилась до $306,9 \pm 25,7$ млн. тонн CO_2 , несмотря на сокращение площадей пахотных земель за исследуемый период почти на 30%. Повидимому, это связано с сокращением поступления соединений углерода в почвы, и, прежде всего, с резким уменьшением использования органических удобрений. Их внесение сократилось в течение рассматриваемого периода почти на 90% с 1990 до 2005 г.

Мониторинг потока углекислого газа на почвах кормовых угодий

Расчет почвенного органического углерода на землях сенокосов и пастбищ проводят на основе балансовой модели аналогично методике, рекомендуемой нами для пахотных земель. Фотосинтез произрастающих на этих землях растений и оставленный на пастбищах навоз домашних животных (C_{MAN}), рассматриваются как статьи поступления углерода в почвы. Для расчета выноса углерода с луговых земель оценивают механические потери углерода почв с эрозией и дефляцией, вынос углерода с биомассой надземной части растений при покосе (для сенокосов) (C_{HAY}) и потреблении пастбищных кормов животными (для пастбищ) (C_{PAST}), а также при дыхании почв (уравнения 18 и 19). Внесение органических и минеральных удобрений, а также известкование почв теоретически могут проводиться на территории сенокосов и пастбищ и

должны рассматриваться в модели, однако на практике объемы этих работ в аграрном секторе сильно сократились и, по-видимому, все удобрения и добавки в настоящее время вносятся только на пахотных землях.

$$Chay_{BAL} = (C_{ORG} + C_{MIN} + C_{lime} + C_{BIO}) - (C_{Erosion} + C_{HAY} + C_{RES}) \quad (18)$$

$$Cpast_{BAL} = (C_{ORG} + C_{MIN} + C_{lime} + C_{MAN} + C_{BIO}) - (C_{Erosion} + C_{PAST} + C_{RES}) \quad (19)$$

где $Chay_{BAL}$ – годовой баланс (нетто-изменение) почвенного органического углерода сенокосов, тыс. тонн С/год; $Cpast_{BAL}$ – годовой баланс (нетто-изменение) почвенного органического углерода пастбищ, тыс. тонн С/год.

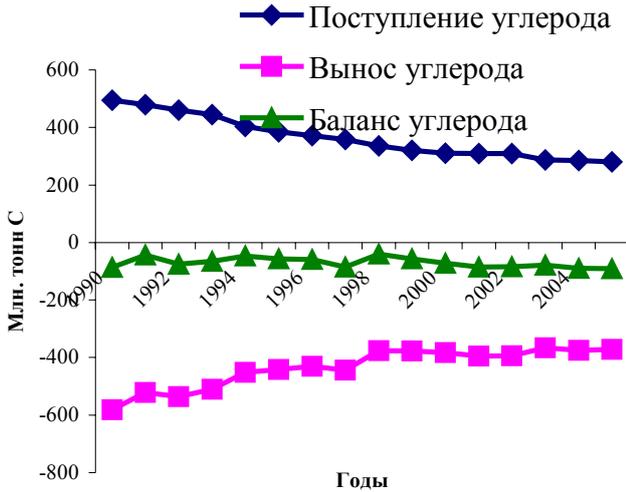


Рис. 6. Ежегодный баланс углерода в пахотных почвах за период с 1990 по 2005 гг., млн. тонн С.

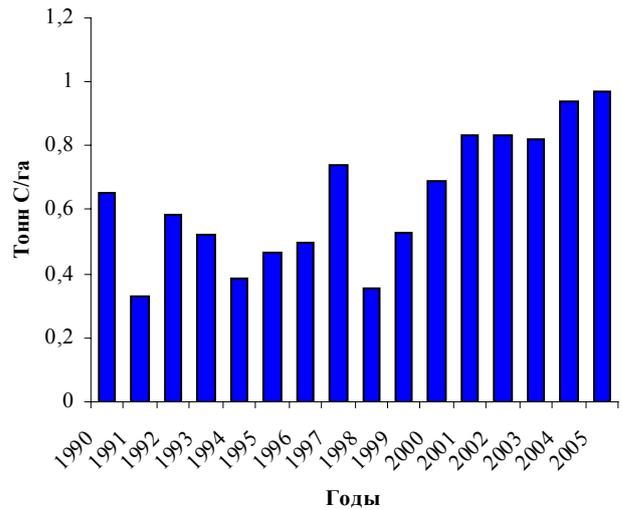


Рис. 7 Годовой нетто-поток углерода из пахотных почв в расчете на один гектар за период с 1990 по 2005 гг., тонн С/га

Оценка поступления фотосинтетически связанного за год углерода (C_{BIO}) для сенокосов и пастбищ выполняется хлорофилльным способом. Могут использоваться средние величины проективного содержания хлорофилла (22 кг/га) и его продуктивности (около 145 кг С фитомассы/кг хлорофилла) (Заварзин, 2001). Таким образом, в среднем за год на гектар площади поступает около 3,19 ($\pm 20\%$) тонн атмосферного углерода. Рекомендуется получение более точных данных по величинам проективного содержания хлорофилла на землях луговых угодий с помощью метода дистанционного зондирования. Расчет выполняется по уравнению 16.

Методика оценки поступления углерода с навозом и пометом в почвы пастбищ разработана по суточным нормам выхода навоза и помета для разных видов сельскохозяйственных животных и птицы, а также величинам влажности их экскрементов (ОНТП 17-81, 1983; Агрохимия, 1984) (табл. 8). Для животных, по которым необходимые данные в исследованной литературе нами не обнаружены (козы, верблюды, мулы, ослы и северные олени), среднесуточный выход навоза рассчитывался с учетом соотношения коэффициентов эмиссии CH_4 от навоза этих видов и биологически близких видов животных, для которых выход навоза

известен. Среднее содержание углерода в навозе (помете) пастбищных животных определялось по данным (Бамбалов, Янковская, 1994; Васильев, Филиппова, 1988).

Табл. 8

Выход навоза и помета при выпасе сельскохозяйственных животных (выгуле птицы) и коэффициенты эмиссии CO₂ от навоза и помета пастбищ

Категория животных и птицы	Среднесуточный выход навоза (помета), кг сырого вещества/гол. в сут. (±10%)	Влажность, % (±3%)	Годовой выход навоза (помета) на пастбищах, кг сух. в-ва/гол. в год (±10%)	Коэффициент эмиссии CO ₂ , кг/гол. в год (±15%)
Коровы	35,0	85,2	429,7	3,13*
Другое поголовье КРС	30,0	83,0	510,1	1,78*
Овцы	3,2	70,2	64,0	0,13
Козы	2,0	70,2	40,4	0,08
Верблюды	25,7	77,5	388,9	1,06
Лошади	22,5	77,5	340,3	0,93
Мулы	12,3	77,5	185,9	0,51
Ослы	12,3	77,5	185,9	0,51
Птица				
-мясные куры	0,29	74,5	1,7	0,01
-куры-несушки	0,18	74,5	1,1	0,02
-цыплята	0,15	74,5	0,9	0,01
-гуси	0,59	84,0	2,3	0,01
-гусята	0,44	84,0	1,7	0,01
-другая взрослая птица	0,44	79,3	2,1	0,03
-молодняк другой птицы	0,38	79,3	1,9	0,01
Северные олени	6,0	77,5	90,3	0,25

* по данным 2005г.

Для определения доли углерода, поступающей из твердых экскрементов в почвы пастбищ, необходимо вычесть из общей величины экскретируемого углерода его потери с газообразными эмиссиями CH₄ и CO₂, а также с поверхностным смывом в водоемы. Учитывая, что потери углерода при эрозии и дефляции почв определяли по данным смыва органического вещества с территории водосборов, вымывание углерода из навоза, оставленного на пастбищах, уже учтено в нашем балансе. Коэффициенты эмиссии CO₂ могут быть определены на основе коэффициентов эмиссии CH₄ с учетом соотношения среднего выхода этих газов из навоза животных (CH₄ 60% (55-65%), CO₂ 40% (35-45%)) (Козьмин и др., 1998). Полученные значения коэффициентов эмиссии CO₂ приведены в табл. 8.

Таким образом, оценка поступления углерода в почвы пастбищ из навоза и помета выполняется по системе следующих уравнений:

$$C_{MAN} = (C_{EX} - C_{lost}) / 1000000 \quad (20)$$

$$C_{EX} = \sum_i [N_i \cdot MS_{IPAST} \cdot EX_i \cdot (1 - Water_i) \cdot 365] \cdot C_i \% \quad (21)$$

$$C_{lost} = \sum_i [(N_i \cdot MS_{iPAST} \cdot EF_{CH_4}) \cdot 12/16 + (N_i \cdot MS_{iPAST} \cdot EF_{CO_2}) \cdot 12/44] \quad (22)$$

где C_{EX} – общее количество экскретируемого углерода на пастбищах, кг С/год; C_{lost} – общее количество углерода навоза (помета), теряемое с эмиссиями CH_4 и CO_2 , кг С/год; MS_{iPAST} – доля годового времени, проводимого данной категорией животных или птицы на пастбищах и выгулах (см. табл. 2); EX_i – среднесуточный выход навоза (помета) для данной категории животных или птицы, кг сырого в-ва/гол. в сут. (см. табл. 8); $Water_i$ – влажность свежего навоза (помета) данной категории животных или птицы, доля (см. табл. 8); $C_i\%$ – среднее содержание углерода в навозе (помете), доля ($\pm 5\%$) (лошади, мулы и ослы – 0,46; овцы и козы – 0,576; помет птиц – 0,449; КРС и остальные пастбищные животные – 0,402); EF_{CH_4} – коэффициент эмиссии CH_4 от навоза (помета), кг CH_4 /гол. в год (см. табл. 1 и табл.18 диссертации); EF_{CO_2} – коэффициент эмиссии CO_2 от навоза (помета), кг CO_2 /гол. в год (см. табл. 8).

Согласно полученным результатам расчета, фотосинтетический углерод является основным потоком, определяющим общее количество поступающего углерода в почвы кормовых угодий. Вклад углерода навоза и помета, оставленных на территории пастбищ, менее существенен и составляет от 4,4% в 1990 г. до 2,6% в 2005г.

Оценка потерь органического углерода в результате эрозии и дефляции ($C_{Erosion}$) на землях пастбищ и сенокосов выполняется аналогично расчету этой составляющей на пахотных почвах (см. раздел 4.5). C_{HAY} оценивается по валовому сбору сена на территории сенокосов. Расчет C_{PAST} выполняется в соответствии со следующей методологией:

$$C_{PAST} = C_P + C_{CONS} \quad (23)$$

$$C_P = (Fodder_{PAST} \cdot k) \cdot C_{content} \quad (24)$$

$$C_{CONS} = (Val_{GF} + Val_S + Val_H) \cdot C_{content} \quad (25)$$

где C_P – вынос углерода при поедании травы пастбищными животными, тыс. тонн С/год; C_{CONS} – вынос углерода при заготовке кормов на территории пастбищ, тыс. тонн С/год; $Fodder_{PAST}$ – потребление пастбищных кормов сельскохозяйственными животными всех категорий, тыс. тонн кормовых единиц/год; k – среднее содержание кормовых единиц в 1 кг сухого вещества пастбищных кормов, кормовые единицы/кг сух. в-ва пастбищных кормов (см. ниже); Val_{GF} – валовой сбор зеленых кормов на территории пастбищ, тыс. тонн сух. в-ва/год; Val_S – валовой сбор силоса на территории пастбищ, тыс. тонн сух. в-ва/год; Val_H – валовой сбор сена на территории пастбищ, тыс. тонн сух. в-ва/год; $C_{content}$ – среднее содержание углерода в наземной биомассе луговых растений, 45 (41-49)% (IPCC, 1997; GPG, 2000).

Анализ справочной литературы (Кормовые нормы..., 1991) свидетельствует, что для КРС среднее содержание кормовых единиц в килограмме сух. в-ва по 96 видам пастбищных кормов составляет около 0,84. Для нежвачных животных (свиней) аналогичная величина по 56 видам зеленых кормов равна 0,86. Таким образом, в расчетах рекомендуется использовать средний коэффициент $0,85 \pm 0,14$ для перевода данных из кормовых единиц в килограммы сухого вещества пастбищных трав.

Для оценки потерь углерода с дыханием почв были проанализированы данные литературы по экспериментальным оценкам интенсивности дыхания разных типов почв под луговыми сообществами в течение вегетационного периода. Полученное среднее значение равно 421 ($\pm 50\%$) мг $\text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Вклад корней в общее почвенное дыхание в луговых биоценозах равен 45 (± 5) % (Кудеяров, Курганова, 2005). Для расчета годового дыхания почв использовался показатель вклада эмиссии вегетационного периода, рассчитанный на основе среднегодовой температуры воздуха (Кудеяров, Курганова, 2005). Суммарную годовую эмиссию углерода в результате дыхания почв луговых биоценозов определяли по уравнению:

$$C_{RES} = \{[\sum_{region} (A_{region} \cdot CO_2 \cdot VP_{region}) \cdot 0,55 \cdot Summer\%] \cdot 12/44\} / 100000 \quad (26)$$

где A_{region} – площадь сенокосов и пастбищ, в каждой области (регионе), тыс. га; CO_2 – средневзвешенный коэффициент эмиссии CO_2 для оценки дыхания луговых биоценозов, мг $\text{CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$; VP_{region} – продолжительность вегетационного периода в каждой области (регионе), час (см. табл. 41 диссертации); 0,55 и 12/44 – коэффициенты для вычета дыхания корней, и перевода данных из CO_2 в С, соответственно; $Summer\%$ – вклад дыхания в течение вегетационного периода в годовое дыхание почвы, доля.

Баланс углерода почв сенокосов и пастбищ в России за период 1990-2005 гг. представлен на рис. 8. Его величина на сенокосах и пастбищах России практически равна нулю в течение всего рассматриваемого периода. В среднем поток углерода в почвы кормовых угодий составлял около $5,0 \pm 1,6$ млн. тонн С/год (Романовская, Карабань, 2008). Годовой нетто-поток углерода в почву в расчете на один гектар земель кормовых угодий в стране представлен на рисунке 9. В течение лет с 1990 по 2005 г. антропогенная нагрузка на сенокосы и пастбища сокращалась, что привело к уменьшению вклада сенокосения и выпаса в общий вынос углерода с территории кормовых угодий. При сохранении этой тенденции можно ожидать увеличение накопления углерода на этих землях в ближайшие годы.

Глава 5. РАСЧЕТНЫЙ МОНИТОРИНГ ПОГЛОЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ АТМОСФЕРЫ ПОЧВАМИ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ РОССИИ

Расчетный мониторинг почвенного органического углерода залежных земель с применением метода математического моделирования выполнен нами для территории России впервые. Работа выполнена в три последовательных этапа: 1. выбор модели, ее инициализация и получение предварительных результатов моделирования; 2. анализ полученных результатов и экспериментальных данных для уточнения входных данных и адаптации параметров модели к условиям залежных земель; 3. апробация усовершенствованной модели в расчетном мониторинге поглощения CO_2 почвами залежных земель России с 1990 по 2005 год.

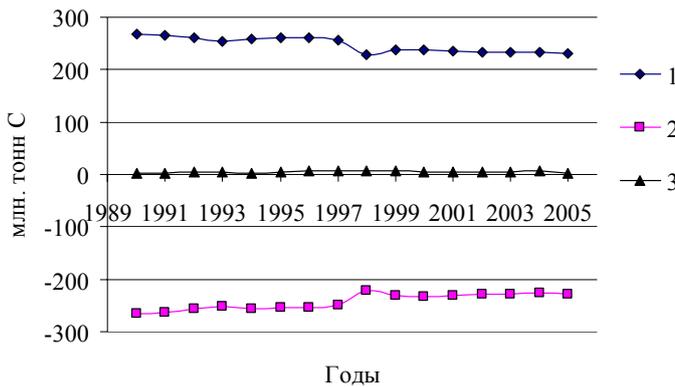


Рис.8 Баланс почвенного углерода на землях сенокосов и пастбищ в течение периода с 1990 по 2005гг., млн. тонн С, 1 - поступление углерода; 2- вынос; 3- баланс

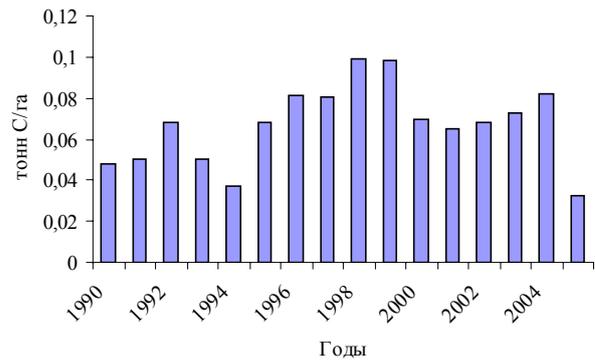


Рис. 9 Годовой нетто-поток углерода в почвы кормовых угодий в расчете на один гектар за период с 1990 по 2005 гг., тонн С/га.

По данным государственной статистики оценена площадь земель, выведенных из сельскохозяйственного использования с 1990 по 2005 г. включительно, которая составляет 27,9 млн. га. В 1990 г. общая площадь залежных земель соответствовала 0,3% площади сельскохозяйственных угодий в стране, а к 2005г. – 14,5% (см. рис. 10). Значительные территории выведены из эксплуатации в Центральном районе, в Поволжье, в Уральском и Сибирских районах. Наименьшая удельная площадь залежей наблюдается в центрально-черноземном и южных районах РФ с благоприятными для сельского хозяйства климатическими и почвенными условиями.

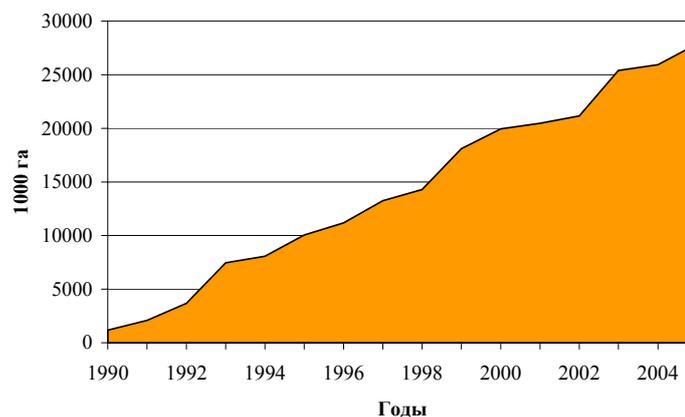


Рис. 10 Площади залежных земель в России за 1990-2005 гг., тыс. га

Для проведения расчетного мониторинга поглощения CO_2 почвами залежей нами выбрана модель RothC (Coleman, Jenkinson, 1996). Эта модель пригодна для использования на территории России. В качестве исходных данных требуются сравнительно легко доступная информация по климату, почвам и растительности. Модель имеет удобное временное разрешение и позволяет рассчитывать содержание органического углерода ежемесячно.

Для проведения первого этапа моделирования территория России была подразделена на 40 регионов, для которых по данным литературы определены усредненные базовые почвенные и климатические характеристики и поступление органического вещества в почвы при зарастании.

Итоги первого этапа выявили необходимость выполнения сравнительного анализа модельных расчетов и экспериментальных данных изменения запасов почвенного органического углерода залежных земель в районах с максимальными и минимальными темпами накопления углерода, а также в районах, в которых получены не согласующиеся с соседними зонами результаты.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что во всех исследованных регионах содержание углерода почв постепенно увеличивалось в ряду пашня – залежи – целина. Однако для почв залежей около 5 лет получены самые высокие степени неопределенности оценок содержания углерода, которые свидетельствуют о возможности потерь почвенного углерода в этих землях по сравнению с пахотными почвами (см. рис. 11). После трех лет зарастания брошенных посевов многолетних трав на болотных низинных почвах Мурманской области в слое почвы 0–20 см накоплено 0,07% С от уровня пашни. В среднем для шести- и восьмилетних залежей этих почв содержание органического углерода увеличилось соответственно на 0,2% и 0,46% С. В Свердловской области в течение 16 лет зарастания содержание органического углерода чернозема оподзоленного увеличилось на 0,94% С ($15,2 \pm 1,7$ т С/га), а дерново-подзолистые суглинистые почвы накапливали в среднем $0,08 \pm 0,03\%$ С/год ($1,40 \pm 0,46$ т С/(га/год)). В Московской области серые лесные почвы в среднем накопили около 0,5% С ($14,8 \pm 1,6$ т С/га) в течение 15ти лет; дерново-подзолистые суглинистые почвы – 0,3% С ($8,9 \pm 0,9$ т С/га) и дерново-подзолистые супесчаные – 0,6% С ($17,8 \pm 1,9$ т С/га) за этот период.

Почвы молодых залежей Ставропольского края характеризовались потерями органического углерода в течение первых 3-5 лет зарастания. Средние потери углерода за первые 4 года в пахотном горизонте составили около $2,2 \pm 1,2$ тонн С/га в год. По-видимому, значительные потери объясняются теплым климатом Ставропольского края, который способствует быстрой минерализации органического вещества, а также малой продуктивностью луговых биоценозов в степной зоне и сравнительно медленным развитием сукцессии на залежах этой зоны. После 4х летнего возраста к 12 годам зарастания почвы в среднем накопились $0,5 \pm 0,2\%$ С, что соответствует около $11,0 \pm 5,3$ тонн С/га ($1,24 \pm 0,56$ тонн С/га в год). Черноземы характеризовались меньшими темпами накопления углерода после 4х лет зарастания ($0,04 \pm 0,02\%$ С в год) по сравнению с темно-каштановыми почвами – $0,08 \pm 0,02\%$ С в год, в то время как, темпы потерь до возраста 4х лет были очень близки: $0,10 \pm 0,035\%$ С в год и $0,09 \pm 0,023\%$ С соответственно.

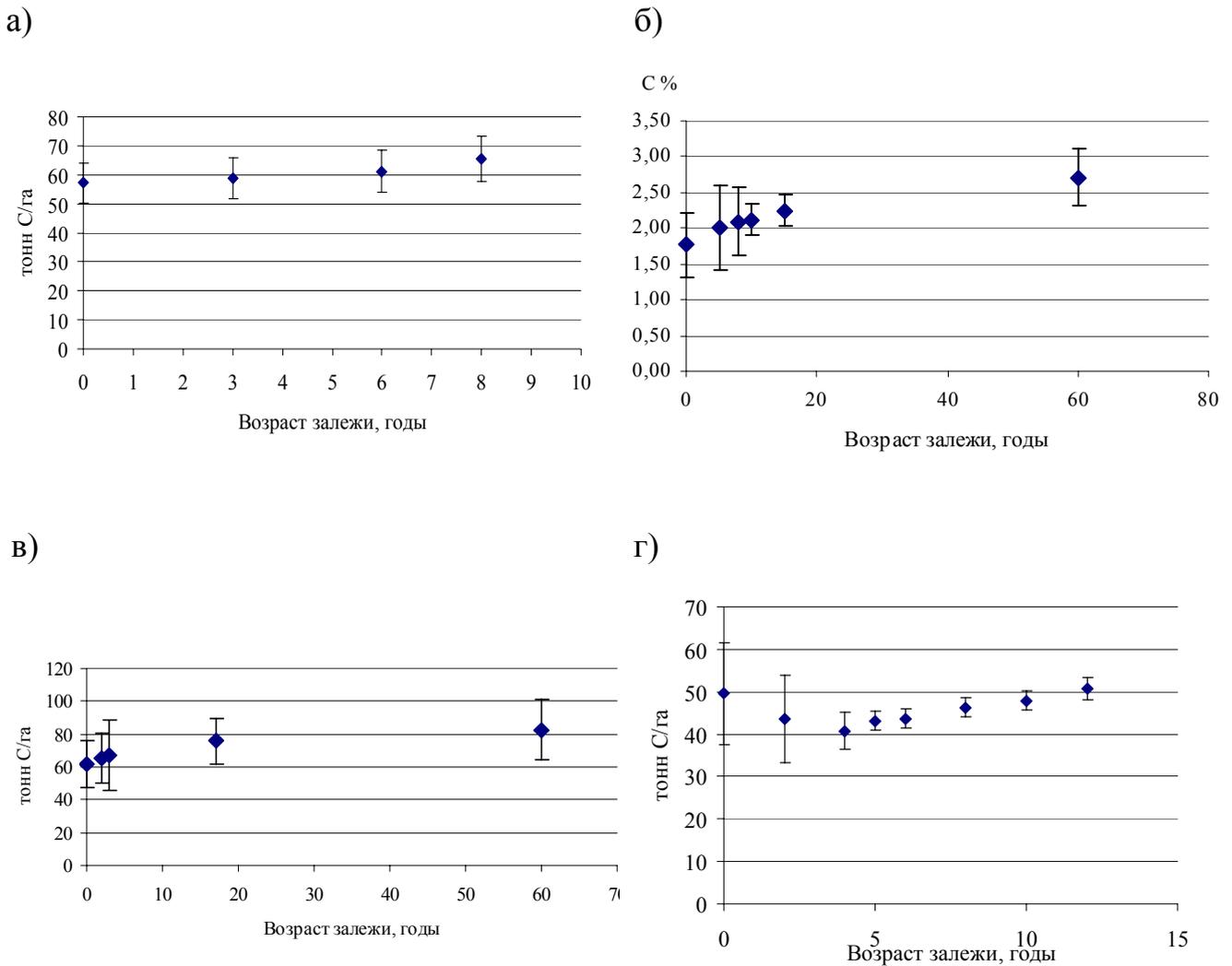


Рис.11 Среднее изменение запасов почвенного органического углерода на залежных землях: а) Мурманской обл., б) Московской обл., в) Свердловской обл., г) Ставропольского края.

В других исследованных областях запасы углерода молодых залежей (до 5 лет) некоторых типов почв также характеризовались низкими значениями по сравнению с запасами углерода пашен. Так, в Московской области почвы под молодыми залежами Подольского, Можайского и Каширского районов, а также все дерново-подзолистые почвы Свердловской области, характеризовались уменьшением запасов углерода по сравнению с пашней. Различия могут объясняться пространственной вариабельностью содержания почвенного углерода. Другая возможная причина относительно высокого содержания углерода в современных пахотных почвах может быть связана с тем, что в первую очередь забрасывали менее плодородные земли, которые изначально характеризовались низким содержанием углерода. Можно также предположить, что на суглинистых почвах в первые годы зарастания может формироваться малопродуктивное сообщество однолетних и двулетних растений, которое обуславливает низкое поступление органических остатков в почвы. Кроме того, отсутствие перемешивания почвы в результате вспашки, а также процессы

оподзоливания могут приводить к снижению содержания углерода в среднем для слоя 0-20см почв тяжелого механического состава под молодой залежью.

На основании анализа результатов первого этапа моделирования и данных полевых исследований на 80 пробных площадках 4х регионов России были уточнены входные данные модели по запасам углерода исходных пахотных почв. Также проведена калибровка констант минерализации органического вещества, используемых в модели RothC, для ее адаптации к специфике скоростей микробных процессов в зарастающих землях. Полученные экспериментальные результаты по интенсивности дыхания образцов почв Луховского и Дмитровского районов Московской области свидетельствуют, что наблюдается тенденция увеличения величины минерализованного углерода почв по отношению к его общему пулу в ряду пахотные земли, залежи разного возраста и лесные биоценозы. Разработаны калибровочные коэффициенты для зон смешанных и широколиственных лесов от 5 до 35 лет зарастания залежи ($R^2=0,99$):

$$KK = 0,00008x^3 - 0,0057x^2 + 0,1397x + 0,4667 \quad (27)$$

где KK – калибровочный коэффициент для константы минерализации органического вещества почв; x - возраст залежи, годы.

На примере исследования почв Мурманской области получен калибровочный коэффициент для условий северной тайги (понижение константы минерализации гумифицированного органического вещества почвы с четвертого года зарастания на 10%).

В наших модельных расчетах, выполненных на первом этапе работы (Романовская, 2006), залежные земли характеризовались более медленным накоплением углерода почв по сравнению с полученными экспериментальными результатами. Очевидно, что нами было принято медленное по сравнению с реальными данными нарастание потенциала продуктивности растительности на залежных землях (Романовская, 2006). Соответственно, входные параметры модели RothC по ежегодному поступлению растительных остатков на залежах были изменены в целях получения максимально приближенных результатов модельных расчетов к экспериментальным данным. Изменение массы поступающих органических остатков исследованных растительных зон определено подбором величин, дающих наилучшие результаты относительно экспериментальных данных. Результаты расчетов приведены на рисунке 12. Моделирование продуктивности наземной биомассы на залежах Свердловской области и Ставропольского края верифицировано с экспериментальными данными.

При моделировании продуктивности растительности на залежных землях в Московской и Свердловской областях (зоны смешанных и широколиственных лесов) получены сходные зависимости (рис. 12 б и в). Так, в течение первых 5-6 лет зарастания, как правило, происходит резкое нарастание продуктивности наземной биомассы, связанное с бурным развитием однолетних и корневищных растений (бурьянистая стадия). Их суммарная годовая продуктивность может превышать средние показатели, характерные для коренных луговых сообществ

рассматриваемых растительных и климатических зон. Совместно со сменой стадии зарастания после 5-6го года на залежах начинают формироваться сообщества длиннокорневищных и рыхлодерновинных злаков, и общая продуктивность трав снижается. В менее благоприятных условиях северной тайги (Мурманская область) и сухих степей (Ставропольский край) продуктивность растений нарастает практически линейно, постепенно достигая значений, характерных для целинных сообществ каждой зоны.

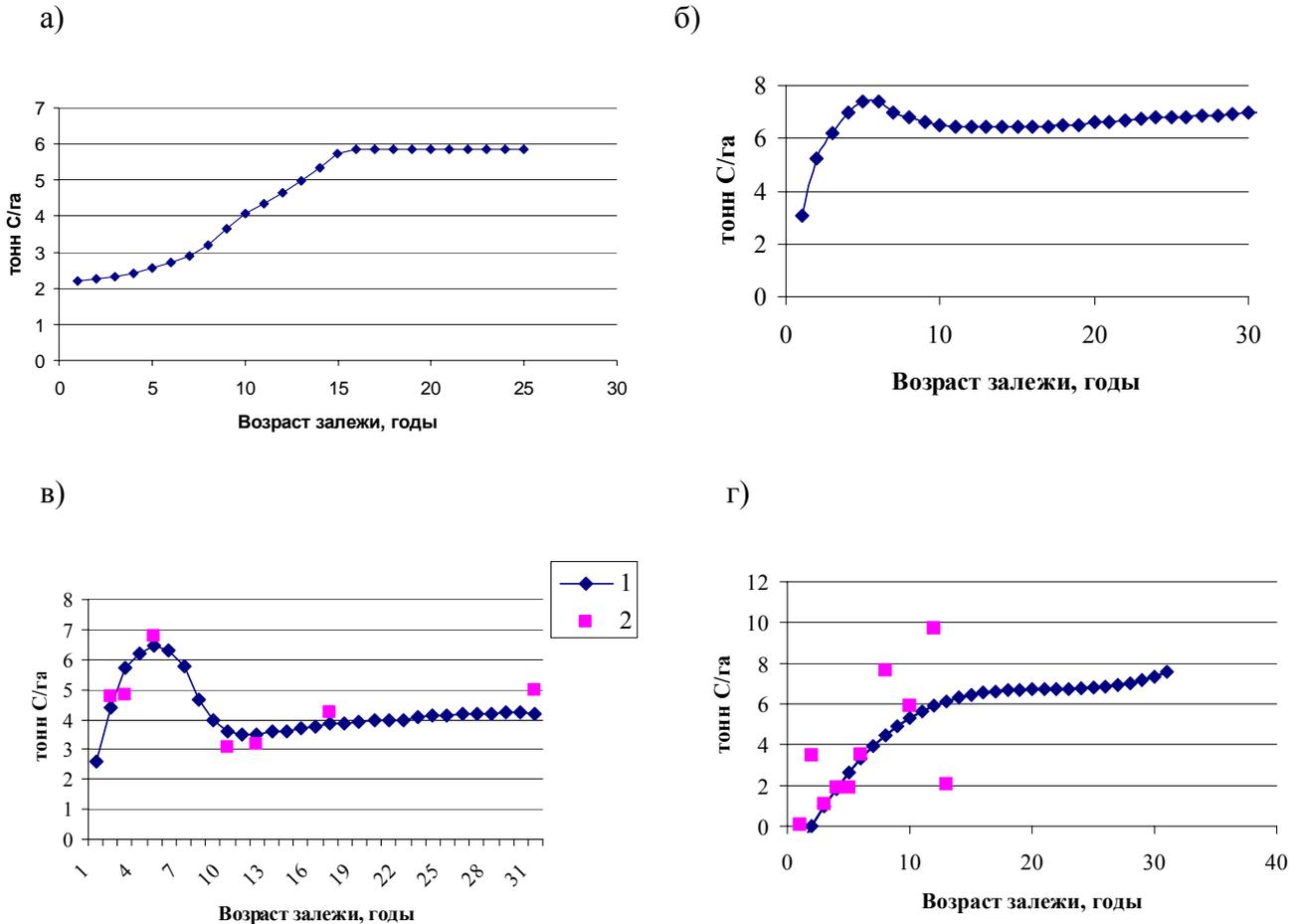


Рис. 12. Моделирование поступления растительных остатков в залежные земли: а) Мурманской области; б) Московской области; в) Свердловской области, где 1 – моделирование; 2 – экспериментальные данные; г) Ставропольского края.

Для проведения мониторинга поглощения CO_2 почвами залежных земель нами составлена карта ГИС, имеющая три взаимосвязанных слоя: почвенная карта России, карта типов растительности и административная карта страны, и выявлено 1206 полигонов пахотных земель, каждый из которых характеризуется уникальным набором почвенных, растительных характеристик и областной принадлежности. Для всех полигонов заданы начальные параметры модели по среднемесячным погодным данным в течение всех лет периода с 1990 по 2005 год. Начальный запас почвенного органического углерода определен по информации справочников и обзоров литературы и результатам собственных исследований. Ежегодную продуктивность

растительности рассчитывали как долю от максимально возможной продуктивности луговых сообществ в данной растительной зоне, полученную по данным литературы. Значение долей определяли для каждого года на основе полученных зависимостей. Распределение площадей залежных земель по типам почв в каждом административном субъекте России было выполнено на основе соотношения площадей этих типов почв.

Результаты расчета с использованием откалиброванной для залежных земель модели RothC и на основании полученных входных параметров модели и рассчитанных площадей залежных земель показывают, что за период с 1990 по 2005гг. залежные земли России аккумулировали 248 млн. тонн С, что соответствует 910 млн. тонн CO₂ ($\pm 14,9\%$). В течение периода с 1990 по 1999 среднее ежегодное поглощение атмосферного CO₂ общей площадью залежных почв составляло около $41,1 \pm 28,5$ млн. тонн CO₂/год, а с 2000 по 2005 г. $83,3 \pm 15,6$ млн. тонн CO₂/год, что соответствует $1,08 \pm 0,45$ и $0,97 \pm 0,21$ тонн С/га в год по России. Постепенное снижение скорости удельной аккумуляции между 1990-ми годами и 2000-2005г. объясняется увеличением возраста залежей, которое сопровождается уменьшением интенсивности нарастания запасов почвенного углерода и, соответственно, скорости поглощения атмосферного CO₂. Распределение величин удельного накопления почвенного углерода на залежных землях по территории России показывает увеличение поглощения углерода от северных регионов к центральным, при переходе от зон северной и средней тайги к южной тайге и смешанным лесам. И затем снижение аккумуляции углерода и даже его потери при переходе к южным регионам и степной зоне. Это распределение в целом повторяет изменение продуктивности луговых сообществ, которая может считаться ведущим фактором, воздействующим на изменение запасов углерода залежных земель. Максимальная продуктивность луговой растительности определена для зон южной тайги и смешанных лесов, а также в зоне луговых степей.

Глава 6. ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТНОГО МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ И СТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ, ПРИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ И ИЗМЕНЕНИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Оценка неопределенности расчетного мониторинга антропогенных эмиссий метана и закиси азота в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании выполнена по методу Монте-Карло с использованием программного обеспечения SimLab. При этом определяли стандартные отклонения для конечных и промежуточных результатов по каждому этапу расчета и для суммарных эмиссий. При вычислении неопределенности общих эмиссий парниковых газов учитывались корреляции между некоторыми категориями источников.

Неопределенность оценки суммарных эмиссий метана и закиси азота в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании оценивается равной $\pm 18,6\%$ (стандартное отклонение). Рассчитанный 95% доверительный

интервал $\pm 37,1\%$. Расчетный мониторинг эмиссий парниковых газов от рассматриваемых источников включает оценку интенсивности разнообразных микробиологических процессов, происходящих в кишечнике животных, навозе, почвах и водоемах в условиях разных биоклиматических зон нашей страны, и поэтому полученная величина погрешности для суммарных эмиссий свидетельствует о достаточно высокой точности проведенных расчетов. Неопределенность балансового метода по расчету изменений запасов почвенного углерода на минеральных почвах пахотных земель и кормовых угодий экспертно оценивается в пределах $\pm 30\%$. Однако, как показывает сравнительный анализ расчетных данных и экспериментально полученных величин по пахотным землям, ошибка расчетов по данному методу в действительности может быть значительно ниже. Для оценки неопределенности результатов расчетного мониторинга поглощения CO_2 почвами залежных земель нами были получены данные по отдельным полевым исследованиям органического вещества залежных почв, выполненные на нескольких типах почв в разных регионах страны. Оценку неопределенности расчетов проводили методом сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования по конкретным типам почв и регионам. Средняя ошибка моделирования стока CO_2 на залежных землях оценивается в пределах $\pm 14,9\%$, что соответствует $\pm 37,0$ млн. тонн С или $\pm 135,5$ млн. тонн CO_2 для полученных нами оценок за 1990-2005 г. (поглощение 248 млн. тонн С). Полученная оценка неопределенности свидетельствует о высокой точности проведенных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе разработаны основы и дано обоснование системы расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов. Ее основная задача заключается в оценке антропогенного вклада в атмосферные концентрации парниковых газов и их возможное влияние на климат. Совместный анализ результатов расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов с результатами фоновое мониторинга позволит оценить фактическое состояние атмосферы с учетом соотношений парниковых газов антропогенного и естественного происхождения. Расчетный мониторинг антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов может применяться в качестве инструментальной базы при оценке экологической эффективности мер по снижению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов. При этом эффект должен рассматриваться в совокупности по всем парниковым газам и наиболее опасным загрязняющим веществам. Расчетный мониторинг антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов включает наблюдения (с использованием моделирования) за интегральными показателями экосистем и может использоваться в части экологического мониторинга. Связь расчетного мониторинга эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения со спутниковым мониторингом может расширить возможности применения данной информационной системы. Установлены источники и поглотители CO_2 , N_2O и CH_4 , которые должны быть

включены в структуру системы расчетного мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования.

2. Усовершенствованы методологии оценки потоков парниковых газов для основных категорий источников и поглотителей в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании: эмиссия CH_4 от кишечной ферментации домашних животных, эмиссии CH_4 и N_2O в системах сбора и хранения навоза и помета; эмиссия N_2O от пахотных полей; изменение запасов углерода пахотных почв и почв сенокосов и пастбищ, которые отражают специфику ведения сельскохозяйственной деятельности и географические особенности России. Разработанная методика оценки эмиссий CH_4 и N_2O в животноводстве учитывает зависимость величины пересчетных коэффициентов от состава и норм годовых рационов животных, а также условий их содержания. На основе баланса потоков углерода автором разработана модель оценки потока CO_2 на землях пахотных и кормовых угодий. Показано, что углероду биомассы культурных растений принадлежит ведущий вклад в поступление углерода в почвы пахотных и кормовых угодий, а дыхание почв и изъятие биомассы при уборке урожая и потреблении кормов определяют основной вынос углерода.

3. Выявлены основные причины трендов эмиссий и стоков CO_2 , CH_4 и N_2O за 1990 -2005 гг. Статистически достоверное снижение эмиссий CH_4 от 78,0±20,0 млн. тонн CO_2 экв. в год в течение 1990-1999 до 47,5±2,3 млн. тонн CO_2 экв. в год в 2000-2005 и N_2O от 160,0 ±39,2 до 112,0±3,2 млн. тонн CO_2 экв. в год соответственно, связано с уменьшением поголовья скота и птицы, а также сокращением посевных площадей и норм вносимых минеральных азотных удобрений. Наблюдается тенденция увеличения удельной эмиссии CO_2 с территории пахотных почв, которая в течение 1990-1999 в среднем составляла 0,5±0,1 тонн С/га, а в 2000-2005г. увеличилась до 0,8±0,1 тонн С/га. Это объясняется сокращением поступления углерода в почвы, и, прежде всего, уменьшением использования органических удобрений. В течение лет с 1990 по 2005 г. антропогенная нагрузка на сенокосы и пастбища сокращалась, что привело к уменьшению вклада сенокоса и выпаса в общий вынос углерода с территории кормовых угодий.

4. Выявлены величины среднего накопления почвенного углерода на залежных землях 4х регионов, находящихся в разных биоклиматических и растительных зонах России. В среднем для восьмилетних залежей на болотных низинных почвах Мурманской области содержание органического углерода увеличилось на 0,46% С. В Свердловской области за 16 лет зарастания содержание органического углерода чернозема оподзоленного увеличилось на 0,94% С (15,2 ± 1,7 тонн С/га), а дерново-подзолистые суглинистые почвы накапливали в среднем 0,08 ± 0,03% С/год (1,40 ± 0,46 тонн С/га в год). В Московской области в течение 15ти лет серые лесные почвы в среднем накопили около 0,5% С (14,8 ± 1,6 тонн С/га); дерново-подзолистые суглинистые почвы – 0,3% С (8,9 ± 0,9 тонн С/га) и дерново-подзолистые супесчаные – 0,6% С (17,8 ± 1,9 тонн С/га). Средние потери углерода почвами

молодых залежей Ставропольского края за первые 4 года в пахотном горизонте составили около $2,2 \pm 1,2$ тонн С/га в год. После 4х летнего возраста к 12 годам зарастания почвы Ставропольского края в среднем накопили $0,5 \pm 0,2\%$ С ($1,24 \pm 0,56$ тонн С/га в год). Во всех областях для почв залежей около 5 лет зарастания получены самые высокие степени неопределенности оценок содержания углерода, которые свидетельствуют о возможности потерь почвенного углерода по сравнению с пахотными почвами.

5. На основе полученных экспериментальных результатов по интенсивности дыхания почв залежных земель проведена калибровка констант минерализации модели RothC для залежных земель в зонах смешанных и широколиственных лесов, получен калибровочный коэффициент для условий северной тайги. Выявлена тенденция увеличения величины минерализованного углерода почв по отношению к его общему запасу в ряду пахотные земли – залежи разного возраста – лесные биоценозы в Московской области. Показано, что продуктивность растительности в зоне смешанных и широколиственных лесов Европейской части РФ и Урала имеет сходные зависимости: резкое нарастание продуктивности в течение первых 5-6 лет зарастания в результате развития однолетних и корневищных растений и затем снижение продуктивности. В менее благоприятных условиях северной тайги и сухих степей продуктивность растений нарастает практически линейно, постепенно достигая значений, характерных для целинных сообществ.

6. Результаты расчета с использованием откалиброванной для залежных земель модели RothC показывают, что за период с 1990 по 2005гг. залежные земли России аккумулировали 248 млн. тонн С, что соответствует 910 млн. тонн CO_2 ($\pm 14,9\%$). В течение периода с 1990 по 1999 среднее ежегодное поглощение атмосферного CO_2 общей площадью залежных почв составляло около $41,1 \pm 28,5$ млн. тонн CO_2 /год, а с 2000 по 2005 г. $83,3 \pm 15,6$ млн. тонн CO_2 /год, что соответствует $1,08 \pm 0,45$ и $0,97 \pm 0,21$ тонн С/га в год по России. Выявлены закономерности в распределении величины поглощения атмосферного CO_2 по территории России: увеличение при переходе от северных регионов к центральным, и снижение аккумуляции (и даже потери углерода почв) при переходе к южным регионам и степной зоне. Показано, что ведущим фактором, воздействующим на изменение запасов углерода залежных земель, является продуктивность луговых сообществ.

7. Стандартное отклонение суммарных эмиссий CH_4 и N_2O в животноводстве и при сельскохозяйственном землепользовании оценивается по методу Монте-Карло равным $\pm 18,6\%$ (95% доверительный интервал $\pm 37,1\%$). Неопределенность балансового метода по расчету изменений запасов почвенного углерода на землях пахотных и кормовых угодий изменяется в пределах $\pm 30\%$. Средняя ошибка моделирования стока CO_2 на залежных землях оценивается в пределах $\pm 14,9\%$. Полученные величины погрешности свидетельствуют о достаточно высокой точности проведенных расчетов.

Список публикаций по теме диссертации согласно перечню ВАК

1. Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Конюшков Д.Е., Назаров И.М., Романовская А.А. Антропогенная эмиссия закиси азота сельскохозяйственными землями России и ее роль в глобальном изменении климата. Метеорология и гидрология. 2000, 6, стр. 39-45.
2. Гитарский М.Л., Романовская А.А., Карабань Р.Т., Конюшков Д.Е., Назаров И.М. Эмиссия закиси азота при использовании минеральных удобрений в России. Почвоведение. 2000, 8, стр. 943-950.
3. Романовская А.А., Гитарский М.Л., Конюшков Д.Е., Карабань Р.Т., Назаров И.М. Интенсивность почвенной эмиссии закиси азота при внесении разных доз минеральных азотных удобрений. Сельскохозяйственная биология. 2002, 1, стр. 98-103.
4. Романовская А.А. Эмиссии парниковых газов в аграрном секторе России. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2003, № 7-8, стр.65-70
5. Романовская А.А. Почвенный углерод залежных земель в России. Почвоведение. 2006, №1, стр. 52-61.
6. Романовская А.А. Аккумуляция углерода в болотных низинных почвах залежных земель Мурманской области. Экология. 2006, №6, стр. 424-428.
7. Романовская А.А. Эмиссия закиси азота в животноводстве Российской Федерации в 1990-2004 годах. Доклады РАСХН. 2007, № 5, стр. 42-44.
8. Романовская А.А. Выбросы метана и закиси азота в аграрном секторе России. Метеорология и гидрология. 2008, №2, стр. 87-97.
9. Романовская А.А., Карабань Р.Т. Региональные особенности баланса углерода почв на кормовых угодьях России. Известия РАН. Серия географическая. 2008, №4, стр. 96-104.
10. Израэль Ю.А., Романовская А.А. Основы мониторинга эмиссий и стоков парниковых газов антропогенного происхождения. Метеорология и гидрология. 2008, №5, стр. 5-15.
11. Романовская А.А. Оценка антропогенной эмиссии метана в животноводстве России в 1990-2004гг. Сельскохозяйственная биология. 2008. №6 (в печати).

Список основных публикаций по теме диссертации

12. Романовская А.А., Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М. 2001 Оценка эмиссии закиси азота от не утилизируемой в аграрном секторе страны мортмассы сельскохозяйственных растений. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2002, том 18, стр.276- 286.
13. Romanovskaya, A.A, Gytarsky, M.L, Karaban', R.T, Konyushkov D.E, and Nazarov, I.M. The dynamics of nitrous oxide emission from the use of mineral fertilizers in Russia. In Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. TheScientificWorld, 2001, 1 (S2), 336-342.
14. Romanovskaya, A.A, Gytarsky, M.L, Karaban', R.T, Konyushkov D.E, and Nazarov, I.M. 2002. Nitrous oxide emission from agricultural lands in Russia. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Vol.7, No.1, pp.31-43.

15. Romanovskaya, A.A, Gytarsky, M.L, Karaban', R.T, Konyushkov D.E., and Nazarov, I.M. 2002. Non-CO₂ greenhouse gas emissions from agricultural sector in Russia. In proceedings of 3rd International Symposium, Maastricht, The Netherlands 21-23 January 2002, Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific understanding, control options and policy aspects. Edited by J. van Ham, A.P.M.Baede, R. Guicherit, J.G.F.M. Williams-Jacobse. Millpress- Rotterdam Netherlands, pp.29-34.
16. Romanovskaya, A.A, Gitarskii, M.L, Konyushkov D.E, Karaban', R.T, and Nazarov, I.M. Assessment of soil N₂O emission from crop residues and mineral nitrogen fertilizers in Russia. In: 17th World congress of soil science CD-ROM proceedings: Confronting new realities in the 21st century : 14-21 August, 2002, Bangkok, Thailand. - Bangkok : Kasetsart University, 2002. pp. 590-1 - 590-12.
17. Романовская А.А., Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М. Динамика почвенного углерода при зарастании пахотных земель на территории Российской Федерации. В кн.: Экология и биология почв. Материалы Международной научной конференции. Ростов-на-Дону. 22-23 апреля 2004. Издательство ЦВВР. 2004. стр. 248-251.
18. Романовская А.А. Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М. Роль залежных земель России в поглощении атмосферного углерода. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2005, том 20, стр. 219-237.
19. Романовская А.А. Моделирование динамики почвенного углерода в залежных землях России. В сб.: Методы исследований органического вещества почв, М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИИПТИОУ, 2005, стр. 425-441.
20. Romanovskaya A.A. GHG fluxes from agriculture and land-use change in Russia. In proceedings of Workshop on Agricultural Air Quality: State of the Science, 5-8 June 2006. Potomac, Maryland near Washington, DC, USA, pp.1059-1069.
21. Романовская А.А., Карабань Р.Т., Гитарский М.Л., Кузьмичева В.Ю. Почвенный углерод в залежных землях Мурманской области. Материалы Международной Конференции «Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского)», 10-12 октября 2006, г. Апатиты, изд-во Кольский научный центр, 2006, стр. 117-119.
22. Романовская А.А. Сельское хозяйство. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов источниками и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2004. Москва, Росгидромет, 2006, стр. 44-82.
23. Романовская А.А. Пахотные и другие земли сельскохозяйственного назначения. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов источниками и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2004. Москва, Росгидромет, 2006, стр. 99-116.
24. Романовская А.А. Оценка неопределенности инвентаризации выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве России. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXI. Санкт-Петербург, Гидрометеиздат. 2007. стр.44-57.

25. Романовская А.А., Карабань Р.Т. Баланс почвенного углерода возделываемых земель России. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXI. Санкт-Петербург, Гидрометеоздат. 2007. стр. 58-74.
26. Романовская А.А., Аракелян Т.Г. Почвенный органический углерод залежных земель в Московской области. Материалы IV Всероссийской научной конференции «Гуминовые вещества в биосфере», МГУ, Москва, 19-21 декабря 2007г., Санкт-Петербург, стр. 618-626.
27. Dong H., Mangino J., McAllister T.A., Hatfield J.L., Johnson D.E., Romanovskaya A., Lassey K.R., Lima M.A. Emissions from livestock and manure management. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4, Chapter 10. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006.
28. Романовская А.А. Запасы почвенного органического углерода залежных земель Российской Федерации. Материалы Всероссийской научной конференции «Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота», Москва, 13-14 мая 2008 года, Минсельхоз РФ, РАСХН, ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, стр. 13-15.
29. Романовская А.А. Поглощение атмосферного CO₂ залежными землями (на примере Московской и Свердловской областей). Монография РАСХН по глобальным проявлениям климата в агропромышленной сфере. 2008. (в печати)
30. Романовская А.А., Карабань Р.Т. Мониторинг антропогенных эмиссий парниковых газов в аграрном секторе России. Монография РАСХН по глобальным проявлениям климата в агропромышленной сфере. 2008. (в печати)
31. Романовская А.А. Аккумуляция углерода и азота почвами залежных земель России. Сборник Литовского сельскохозяйственного университета «Vagos», 2008 (в печати)