

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт географии Российской академии наук

На правах рукописи

Суховеева Ольга Эдуардовна

**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОТОКОВ CO₂ В АГРОЛАНДШАФТАХ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

25.00.23 – Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор
Карелин Дмитрий Витальевич

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Биогеохимический цикл углерода в агроландшафтах	13
1.1. Парниковые газы в агроландшафтах	13
1.2. Органическое вещество в почве	22
1.3. Потоки CO ₂	33
1.4. Моделирование цикла углерода	42
1.5. Выводы	50
Глава 2. Материалы и методы исследования	52
2.1. Модель DNDC	52
2.2. Территория исследования	60
2.3. Сбор и подготовка данных	75
2.4. Оценка влияния внешних факторов на потоки CO ₂	84
2.5. Статистический анализ	87
2.6. Оценка эффективности моделирования	89
2.7. Выводы	91
Глава 3. Географические особенности потоков CO₂ в агроландшафтах и оценка эффективности их моделирования на основе DNDC	93
3.1. Верификация модели DNDC	93
3.2. Статистический анализ и моделирование эмиссии CO ₂ из почвы на Курской биосферной станции ИГ РАН	98
3.3. Статистический анализ и моделирование эмиссии CO ₂ из почвы на Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН	104
3.4. Статистический анализ и моделирование баланса CO ₂ в экосистеме в Опытном хозяйстве СамГУ	110
3.5. Выводы	119

Глава 4. Модельные эксперименты по оценке потоков CO₂ в агроландшафтах на основе DNDC	120
4.1. Разработка методики применения модели DNDC для оценки потоков CO ₂ в агроландшафтах на территории России	120
4.2. Использование моделирования для анализа влияния внешних факторов на потоки CO ₂ в агроландшафтах	129
4.3. Моделирование изменения потоков CO ₂ в системе «атмосфера – растение – почва»	136
4.4. Анализ потоков CO ₂ в агроландшафтах Центрального Нечерноземья в пространстве и времени	141
4.5. Выводы	151
Заключение	153
Список сокращений и условных обозначений	158
Список литературы	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Диоксид углерода, или углекислый газ (CO_2), является ведущим биогенным химическим агентом, участвующим в круговороте углерода (C), а также одним из важнейших парниковых газов (IPCC, 2014). Он попадает в атмосферу из природных источников – через дыхание автотрофных и гетеротрофных организмов, газообмен между воздухом и океаном, а также от антропогенных выбросов, преимущественно вследствие сжигания ископаемого топлива, обезлесения, пожаров и землепользования (Смирнов, 2016; The global carbon project, 2017).

Одним из главных путей поступления CO_2 в атмосферу является эмиссия его из почв, или почвенное дыхание, формируемое дыханием корней и микробным разложением органического вещества почвы, отмерших растительных остатков и органических веществ, продуцируемых вегетирующими корнями (Bond-Lamberty, Tompson, 2010; Kuzyakov, 2006; Luo, Zhou, 2006; Raich et al., 2002; Степанов 2011). Сумма почвенного и надземного дыхания характеризует валовое дыхание экосистемы, которое совместно с фотосинтезом формирует баланс CO_2 в экосистеме, или чистый экосистемный обмен (Net Ecosystem Exchange, NEE) (Мониторинг потоков, 2017; Чебакова, 2014).

Землепользование не только приводит к увеличению содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, тем самым воздействуя на климат, но и является одним из мощнейших путей по силе и скорости воздействия человека на земные геосистемы, в том числе через замену естественных ландшафтов на агроландшафты. При этом часть природных стоков и источников CO_2 для атмосферы заменяется на антропогенные, связанные с сельскохозяйственной деятельностью, величину изменения которых по сравнению с природными предстоит оценить. В связи с необходимостью разработки стратегии снижения эмиссии в результате сельскохозяйственного землепользования возникает потребность в создании единого подхода, позволяющего учитывать эмиссию CO_2 от комплекса природных и антропогенных факторов на региональном уровне.

В науках о Земле длительное время с успехом используются методы математического моделирования, которое заменяет собой эксперименты, там, где они невозможны, и прямые измерения, там, где они затруднены, а также является альтернативой многолетнему мониторингу. Но единой методики оценки потоков парниковых газов и, в частности, CO_2 на сегодняшний день не существует. В «Национальном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов...» учитывается только антропогенная эмиссия, причем поток парниковых газов от пахотных почв разделяется на два сектора: сектор «Землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства» (где представлены показатели прямой эмиссии CO_2 и CH_4 из почв) и сектор «Сельского хозяйства» (где учитывается эмиссия CO_2 от вкладов известкования и внесения мочевины, выбросы N_2O из почв, CH_4 от рисоводства и использования органических удобрений). Для определения динамики CO_2 в наземных экосистемах в глобальном масштабе применяется балансовый подход (Houghton, 2007; Le Quere et al., 2013), а при интегрировании потоков CO_2 для пахотных почв России – картографический метод в виде наложения друг на друга различных типов карт (Пулы и потоки, 2007; Smith et al., 2007). Для оценки поглощения CO_2 лесами и потенциального запаса углерода в растительном покрове с успехом применяется геоинформационный анализ (Солодянкина, Черкашин, 2011, 2014). Также широко используются регрессионные зависимости эмиссии CO_2 от гидротермических или почвенно-климатических параметров среды (Наумов, 2009; Смагин и др., 2010; Chen et al., 2014).

Сейчас появился целый ряд имитационных моделей биогеохимических циклов углерода и азота, отражающих в том числе эмиссию парниковых газов. Их преимущество состоит в том, что они позволяют одновременно учесть типы почвы, растительного покрова и землепользования, выяснить, как экосистема отреагирует на изменение внешних условий и от каких факторов преимущественно зависит результирующий показатель. Значение имитационного моделирования возрастает при современных быстрых климатических изменениях и формировании новых погодных условий, которые не встречались за прошедшие

периоды инструментальных измерений, используемых для построения моделей других типов, что приводит к ошибкам при экстраполяции данных (Мониторинг потоков, 2017).

DNDC (DeNitrification-DeComposition) – процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода и азота, в том числе биогенных парниковых газов, в почвах сельскохозяйственного назначения (Li et al., 1992a).

Применение DNDC для оценки баланса С и эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства рекомендуется Рамочной конвенцией ООН по изменению климата (РКИК ООН) в качестве альтернативы методикам Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Estimation of emissions from agriculture, 2004), а также допускается методикой ЕХ-АСТ, разработанной ФАО (Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН) (User friendly manual, 2013). С 2012 г. на 38-й встрече рабочей группы РКИК ООН эта модель была официально принята к использованию (Report of the 38th meeting, 2012). Фактически она является единственной имитационной моделью, которая применяется для инвентаризации парниковых газов на государственном уровне и участвует в подготовке национальных отчетов в Великобритании и КНР.

Степень разработанности темы. Модель DNDC широко используется в различных географических регионах и вариантах землепользования и была апробирована в 14 странах мира, в том числе для оценки эмиссии CO₂ из пахотных почв (Bolan et al., 2004). Она показала хорошие результаты при моделировании эмиссии парниковых газов в Азии (Frolking et al., 2004; Zhuang et al., 2004; Pathak et al., 2005; Li et al., 2005b; Qiu et al., 2005), США (Li et al., 1994; Li, 2008), Канаде (Dutta et al., 2016; Yadav, Wang, 2017; Guest et al., 2017) и Австралии (Chen et al., 2013). Эта модель наряду с RothC, CANDY, CENTURY, DAISY, NCSOIL, SOMM, ITE и VERBERNE с успехом использовалась в проекте по оценке динамики органического вещества почв на примере семи длительных опытов в Европе США и Австралии (Smith et al., 1997). DNDC применялась в европейских проектах NOFRETETE, NitroEurope (Giltrap et al., 2010) и CAPRI

(Leip et al., 2008) по оценке биогеохимического цикла азота в пахотных почвах, а также в международной программной инициативе FASCCE-JPI по сельскому хозяйству, продовольственной безопасности и изменению климата между Евросоюзом, США, Канадой, Новой Зеландией, Австралией (FASCCE-JPI projects booklet, 2017), и была в дальнейшем рекомендована для оценки потоков парниковых газов на уровне хозяйств и поиска возможностей их снижения (Rosenstock et al., 2016).

В последние годы были предприняты попытки использовать модель в России для анализа эмиссии закиси азота из почвы, занятой овощными культурами (Бучкина и др., 2007; Balashov et al., 2010, 2014) и эмиссии CO₂ из верховых болот (Kurbatova et al., 2009), но до настоящего времени она еще не была апробирована для оценки потоков CO₂ в агроландшафтах.

Цель исследования – оценить динамику потоков CO₂ и сравнить влияние на них внешних условий в различных по почвенно-климатическим условиям и типам землепользования агроландшафтах на основе имитационного и статистического моделирования. Достижение поставленной цели связано с выполнением следующих **задач**:

1. Адаптировать модель DNDC для условий России и верифицировать ее по данным полевых измерений;
2. Сравнить эффективность имитационного и статистического моделирования при анализе потоков CO₂;
3. Оценить влияние внешних условий и факторов на потоки CO₂ в агроландшафтах на Европейской территории России;
4. Проанализировать пространственно-временную динамику потоков CO₂ в различных типах агроландшафтов Европейской части страны.

Поскольку наиболее распространенными типами агроландшафтов являются пашни (Агроэкологическая оценка земель, 2005), они и были выбраны в качестве **объектов** исследования. **Предметом** исследования являлись основные потоки CO₂ в наземных ландшафтах – эмиссия из почвы, или почвенное дыхание, и баланс в экосистеме, или чистый экосистемный обмен.

Новизна: 1. Разработана стратегия применения имитационной модели DNDC для оценки потоков CO₂ в агроландшафтах на территории России, в том числе скорректированы ее внутренние настройки и параметры в соответствии с условиями страны;

2. Разработан набор из пяти критериев, позволяющий оценить эффективность моделирования и достоверность полученных результатов;

3. Создана комплексная методика оценки влияния внешних факторов на потоки CO₂, в том числе метод шести вариантов агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы;

4. Дан прогноз увеличения абсолютных значений потоков CO₂ в агроландшафтах в ответ на повышение его атмосферной концентрации, приводящего к возможному формированию нулевого баланса органического углерода в пахотных почвах Европейской территории России;

5. На основе изменений природных и антропогенных факторов географической среды рассчитана динамика дыхания почвы, чистого экосистемного обмена и органического углерода в почве в областях Центрального Нечерноземья за 1990-2017 гг.

Теоретическая значимость. Работа создает методологическую основу для понимания причин формирования потоков CO₂ вследствие сельскохозяйственного землепользования и разработки возможных путей их изменения.

Практическая значимость. Разработанная методика оценки потоков CO₂ будет способствовать оптимизации используемых принципов их инвентаризации на территории России, усовершенствованию региональных и глобальных моделей биогеохимического цикла углерода и учету влияния на него климатических изменений. Полученные результаты могут служить основой для организации и планирования производственной деятельности в сельском хозяйстве, направленной на уменьшение антропогенной нагрузки на геосистемы, в том числе на снижение эмиссии парниковых газов в результате землепользования.

Работа выполнена в рамках темы фундаментальных научных исследований

0148-2014-0005 № 01201352499 “Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли” и Программы Президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

Методология и методы исследования. Работа носит расчетно-аналитический характер. Применяется имитационное моделирование и статистический подход, также используются сравнительный и литературно-картографический методы.

Области исследования в соответствии с паспортом специальности 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов. Проведенные исследования отвечают следующим пунктам паспорта специальности: 1. Структура, функционирование и динамика ландшафтов; 4. Геохимия ландшафтов, изучение и моделирование ландшафтно-геохимических процессов; 9. Ландшафтно-геохимические условия миграции элементов в природной среде, специальное почвенно-геохимическое картографирование; 12. География антропогенных ландшафтов и почв, культурной флоры и фауны.

Положения, выносимые на защиту:

1. Антропогенные воздействия на агроландшафты закономерно повторяются, поэтому геохимические процессы в них могут быть оценены на основе математических моделей с использованием местных данных.

2. Разработанная методика применения модели DNDC на территории России для анализа и прогноза потоков CO₂ в агроландшафтах позволяет с большей точностью оценить их величину, чем регрессионные зависимости от температурно-влажностных параметров.

3. В пахотных агроландшафтах основной зоны сельскохозяйственного использования земель Европейской территории России антропогенные факторы оказывают определяющее влияние на динамику формирования потоков CO₂, в отличие от гидротермических условий среды, действие которых оказывается вторичным.

Степень достоверности полученных результатов: 1. Достоверность обеспечивается глубиной исследования основных концепций отечественных и зарубежных ученых по вопросам изучаемой проблемы. При подготовке работы было проанализировано 484 литературных источника, из них 242 на иностранном языке.

2. Измерения в трех полевых опытах, являющихся основой для верификации модели, проводились квалифицированными исследователями с помощью современного высокотехнологичного оборудования.

3. Результативность созданной методики применения DNDC в России оценивалась на базе разработанного набора из пяти критериев, позволяющих оценить эффективность моделирования.

4. Сформулированные научные положения, выводы и рекомендации полностью соответствуют содержанию диссертации и хорошо согласуются с существующими представлениями об особенностях динамики потоков CO₂ в агроландшафтах.

Вклад автора: 1. Созданы базы данных климатических условий, а также характеристик почвенного и растительного покрова полевых агроландшафтов Российского Нечерноземья;

2. Подготовлена информационная основа для корректировки внутренних настроек модели DNDC с целью ее адаптации и верификации для пахотных почв России;

3. Проведен расчет потоков CO₂ и оценена эффективность моделирования при различных почвенно-климатических условиях и типах землепользования на основе статистического и имитационного подходов.

Апробация. Основные результаты исследования были представлены на конференциях:

- *зарубежных:* 5th and 6th International symposiums on soil organic matter (Gottingen, Germany, 2015; Harpenden, United Kingdom, 2017), 21st World congress of soil science “Soil science: beyond food and fuel” (Rio-de-Janeiro, Brazil, 2018);
- *международных:* «Geography, culture and society for our future Earth»

(Москва, 2015), «Anthropogenic evolution of modern soils and food production under changing of soil and climatic conditions» (Орел, 2015), «Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России» (Пенза, 2015), XIX и XX «Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2016-2017), XXIII и XXIV «Ломоносов» (Москва, 2016-2017), «Современная экология: образование, наука, практика» (Воронеж, 2017), К 100-летию Института географии РАН «География и вызовы XXI века» (Москва, 2018);

- *всероссийских*: 4^й «Грани науки» (Казань, 2015), «Математика, информатика, естествознание в экономике и общества» (Москва, 2016), Памяти профессора А.С. Комарова (Пушино, 2016), 5^й «Математическое моделирование в экологии» (Пушино, 2017), «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (Москва, 2017).

Публикации. По результатам исследования опубликованы 25 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных работ, 3 статьи в рецензируемых журналах из базы РИНЦ, 16 тезисов научных конференций и одна база данных.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 34 таблицы и 44 рисунка; состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 484 источника, в том числе 242 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и искреннюю сердечную благодарность научному руководителю Карелину Д.В. за всестороннюю помощь при выполнении диссертации. Автор благодарит сотрудников Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН Курганову И.Н., Лопеса де Гереню В.О., Благодатского С.А., начальника отдела международных связей Самаркандского государственного университета Насырова М.Г. за предоставленные данные и обсуждение работы; директора Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН Романовскую А.А., заведующего кафедрой агрохимии Московского

государственного университета им. М.В. Ломоносова Романенкова В.А., заведующего отделом географии и эволюции почв Института географии РАН Горячкина С.В. за научные консультации, а также участников международной сети DNDC Network и ее координатора Донну Гилтрап (Donna Giltrap) за информационную поддержку.

ГЛАВА 1. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ УГЛЕРОДА В АГРОЛАНДШАФТАХ

Глава представляет собой обзор литературы о состоянии и компонентах биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах и проблемах его моделирования. Описана роль диоксида углерода и других парниковых газов в современных климатических изменениях, оценено содержание и преобразование органического вещества в почвах, рассмотрены дыхание почвы и чистый экосистемный обмен, являющиеся предметом исследования, приведен обзор ключевых моделей для оценки потоков углерода и азота в системе «атмосфера-растение-почва».

1.1. Парниковые газы в агроландшафтах

Проблема парниковых газов. Основными парниковыми газами (ПГ) являются углекислый газ, или диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (NO_2). В конце XX в. были получены данные о том, что на долю роста их концентрации приходится основная часть наблюдаемых изменений климата, в то время как вклад естественных колебаний составляет лишь 25% от наблюдаемого потепления (Kaufman, Stern, 1997).

Доля CO_2 в суммарном радиационном воздействии долгоживущих ПГ составляет 63%, метана – 18,5%, а закиси азота – 6,2% (Задорожний и др., 2010). Но в результате значительного времени пребывания в атмосфере (более 100 лет) и существенного парникового потенциала (в 310 раз превосходящего потенциал CO_2) NO_2 играет важную роль в формировании парникового эффекта (Forster et al., 2007).

По материалам, полученным при изучении ледниковых отложений, содержание аэрозолей и ПГ в воздухе продолжает стремительно увеличиваться. В абсолютных величинах концентрация CO_2 выросла от 285 ppm в начале XIX в. до 335-338 ppm к 80-м гг. XX в., а концентрация CH_4 достигла уровня 1,7 ppm (Хаин,

Халилов, 2008). Если в 2010 г. глобальные усредненные уровни содержания в атмосфере CO_2 , CH_4 и NO_2 были равны 398,0 ppm, 1808 ppb и 323,2 ppb соответственно (Бюллетень ВМО, 2011), то в 2016 г. их концентрации достигли максимумов за 800 тыс. лет и составили для CO_2 $403,3 \pm 0,1$ ppm, для CH_4 853 ± 2 ppb и для N_2O $328,9 \pm 0,1$ ppb (WMO GGB, 2017). Радиационное воздействие на атмосферу, создаваемое долгоживущими ПГ, выросло на 29%, причем 4/5 этого увеличения приходится на CO_2 (Бюллетень ВМО, 2012).

Поток ПГ оценивается как снизу вверх (инвентаризация, статистическая экстраполяция локальных измерений потоков, моделирование), так и сверху вниз (атмосферные инверсии). Чистое положительное совокупное влияние трех ПГ на планетарный энергетический бюджет составляет $3,9 \pm 3,8$ (сверху вниз) и $5,4 \pm 4,8$ (снизу вверх) млрд. т CO_2 экв./год на основе GWP_{100} (потенциала глобального потепления за 100 лет) (Tian et al., 2016).

Обмен ПГ в системе «почва–атмосфера» включает в себя разнообразные процессы их продукции в почве, микробной реутилизации, сорбции, растворения, диффузии, эмиссии с поверхности почвы и поглощения из атмосферы. Влияние почвенно-экологических условий на эмиссию ПГ проявляется в изменениях соотношения процессов обмена или состава образующихся газообразных продуктов. Если размеры продукции больше реутилизируемого количества, наблюдается эмиссия газов, если меньше – поглощение их из приземного слоя атмосферы (Задорожный и др., 2010). При этом антропогенное воздействие на почвенный покров, а именно интенсификация сельского хозяйства, является не менее важным фактором поступления ПГ в атмосферу, чем сжигание ископаемого топлива (Степанов, 2011). Основным же поглотителем ПГ на территории России являются лесные экосистемы (Романовская, Федеричи, 2015).

В методике МГЭИК обмен ПГ в обрабатываемых почвах учитывается в рамках сектора сельского хозяйства, лесного хозяйства и других видов землепользования (МГЭИК, 2006), причем эмиссия CO_2 и CH_4 от пахотных почв учитывается в секторе землепользования, а выбросы трех ПГ от внесения органических удобрений, известкования, рисоводства и прямые выбросы из почв

– в секторе сельского хозяйства (табл. 1). Эмиссия из этого сектора за 2000-2010 гг. составила около четверти чистых антропогенных выбросов ПГ в целом по миру и была равна 10–12 млрд. т CO_2 -экв. год⁻¹. Глобальные выбросы от сельского хозяйства в среднем были равны 5,0-5,8 млрд. т CO_2 -экв. год⁻¹ с преобладанием выбросов N_2O от сельскохозяйственных почв и CH_4 от рисовых полей, энтеральной ферментации скота, уборки, хранения и использования навоза (IPCC, 2014). После индустриальной революции глобальная эмиссия углерода от землепользования и обработки почвы оценивается в 136 ± 55 млрд. т, главным образом вследствие вырубки лесов, сжигания биомассы, преобразования природных экосистем в сельскохозяйственные, осушения болот и обработки почвы (Lal, 2004).

К началу 2000-х гг. прямой выброс N_2O от сельскохозяйственных почв, вызванный с поступлением в почву растительных остатков, азотных минеральных и органических удобрений в аграрном секторе РФ оценивался в 50 млн. т CO_2 -экв. и составлял не более 50% от уровня 1990 г. (табл. 2). Отмечается статистически достоверное снижение эмиссий N_2O от 160,0 \pm 39,2 за 1990-1999 гг. до 112,0 \pm 3,2 млн. т CO_2 экв. год⁻¹ в 2000-2005 гг., что связано с сокращением посевных площадей и норм вносимых удобрений. Тогда как для CO_2 , наоборот, наблюдается тенденция увеличения удельной эмиссии с пахотных почв от 0,5 \pm 0,1 т С га⁻¹ в 1990-1999 гг. до 0,8 \pm 0,1 т С га⁻¹ в 2000-2005 гг. (Романовская, 2008а). По последним данным, пашни в России ежегодно обуславливают эмиссию CO_2 и N_2O около 117,0 и 74,9 млн. т CO_2 -экв. соответственно (Романовская и др., 2014).

Первым международным законодательным актом, стабилизирующим выбросы ПГ и регулирующим загрязнение атмосферы, являлся Киотский протокол (1997), имевший множество преимуществ, но соблюдение которого было связано с некоторыми проблемами (Перес, 2012). Протокол реализовался в России (Алексеев и др., 2010). Сейчас как продолжение инициативы ООН по снижению выбросов ПГ принято Парижское соглашение (2015).

Таблица 1. Эмиссия парниковых газов из пахотных почв России (по материалам Национальных докладов Российской Федерации о кадастре, 1990-2017), тыс. т

Сектор		Сельское хозяйство					Землепользование			
Источник		Использование органических удобрений		Рисоводство	Выброс от почв	Известкование	Внесение мочевины	Пахотные почвы		Площадь пашни
Год	ПГ	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CH ₄	тыс. га
2015		173,40	32,04	24,88	220,66	659,40	1418,80	107613,01	146,06	91539,05
2014		171,06	31,47	24,06	222,43	736,66	1321,91	116244,9	145,78	91543,20
2013		164,38	30,73	23,22	222,61	660,65	1344,84	122663,01	145,72	91161,00
2012		161,68	30,02	24,67	239,30	712,16	1304,27	165055,29	146,05	90895,01
2011		156,80	28,73	25,75	225,90	648,01	1272,88	127249,69	146,39	91232,45
2010		154,56	29,46	24,91	242,65	657,42	1209,38	182412,38	147,30	90430,46
2009		156,71	29,73	22,31	224,96	577,91	1084,47	128114,43	148,84	92374,08
2008		160,23	29,81	19,82	223,14	739,89	1028,92	119659,43	148,70	91256,70
2007		156,64	28,79	19,52	229,32	673,75	1185,32	150194,33	148,93	88974,16
2006		148,89	27,43	19,59	230,83	751,07	1134,72	170914,33	150,44	89751,02
2005		151,15	28,05	17,24	230,75	725,21	1008,94	166230,68	153,21	91401,80
2004		168,94	30,01	15,69	239,05	756,17	979,86	177396,01	157,63	94037,40
2003		178,32	31,29	18,31	242,69	825,83	843,50	179527,99	159,87	95371,51
2002		178,42	31,55	17,54	245,39	796,63	846,36	181058,94	168,54	100547,40
2001		180,75	31,15	18,12	250,80	866,25	755,74	185065,50	171,17	102116,60
2000		183,09	30,76	20,79	263,73	898,33	727,98	211506,09	173,58	103554,30
1999		185,19	30,95	20,25	271,23	802,08	642,93	240904,40	178,00	106192,60
1998		203,12	34,28	17,20	287,95	737,92	565,33	269704,45	185,55	110696,30
1997		223,94	37,63	17,57	268,83	1058,75	639,94	193606,97	192,77	114999,50
1996		253,38	42,06	20,07	287,97	1411,67	834,24	222452,85	198,21	118247,10
1995		286,26	48,01	20,15	301,11	1989,17	873,40	220155,65	202,76	122108,06
1994		322,69	54,19	22,77	298,33	3144,17	726,00	173965,15	206,72	123324,00
1993		349,04	58,17	30,77	331,89	5871,25	776,60	168600,45	211,77	126339,70
1992		376,02	62,26	31,40	399,21	8149,17	912,78	243779,98	215,61	128630,20
1991		415,59	68,82	31,70	464,90	9304,17	936,10	327571,60	219,94	131210,40
1990		427,03	70,96	34,23	486,63	10074,17	990,00	315231,99	222,15	132532,50

Таблица 2. Динамика выбросов парниковых газов от аграрного сектора России (по материалам Национальных докладов РФ о кадастре, 2009-2017)

Год	Общий объем выбросов от аграрного сектора, млрд. т CO ₂ -экв.	Доля закиси азота в общем объеме выбросов, %	Доля метана в общем объеме выбросов, %	Доля выбросов по отношению к 1990 г., %
1990	314 826	-	-	100,0
2007	134 709	68,9	31,1	43,5
2008	144 092	69,3	30,7	45,2
2009	142 375	68,1	31,9	44,8
2010	136 802	67,9	32,1	43,1
2011	144 044	69,7	30,3	45,3
2012	144 222	68,9	31,1	44,7
2013	131 813	57,3	41,2	41,9
2014	132 428	57,0	41,1	42,1
2015	132 127	57,0	41,4	41,9

Для сокращения выбросов ПГ из почв наиболее эффективными методами признаются изменение методов землепользования и использование приемов сохранения почвенного углерода (IPCC, 2007): прежде всего, повышение урожайности культур, рациональное использование пахотных и пастбищных земель, восстановление деградированных земель, улучшение методов возделывания риса, рациональное управление животноводством, уборка, хранение и использование навоза, улучшенные методы внесения азотных удобрений, расширение посевов сельскохозяйственных культур для переработки их в биотопливо. Кроме того, актуальны перевод малопродуктивных земель в восстановительное землепользование, минимальная обработка почвы с мульчированием растительными остатками, использование компоста и навоза в циклах питательных веществ и другие системы устойчивого менеджмента почвенных и водных ресурсов (Lal, 2004).

Метан. CH_4 является одним из компонентов углеродного цикла (рис. 1) и сильным ПГ, парниковый эффект которого в 28 раз превышает CO_2 (IPCC, 2014). Значение потока этого газа на территории России оценивается в 40-50 млн. т C год⁻¹ (Заварзин, Васильева, 1999). Важнейшими его источниками CH_4 в России и мире являются болота и рисовые поля (Глаголев, 2010).

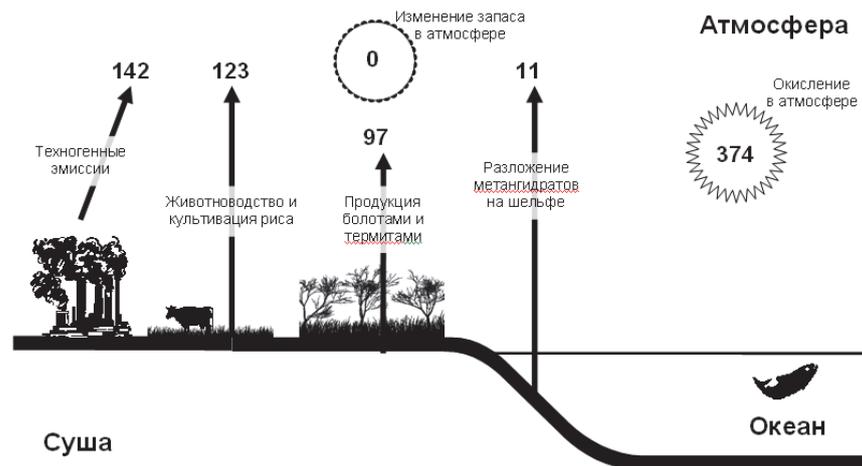


Рисунок 1. Современное состояние биосферного цикла метана, млн. т CH_4 год⁻¹ (Замолодчиков, 2013)

В почве CH_4 подвергается трем процессам: синтезу, окислению и поглощению, поскольку там одновременно присутствуют и метаногены, и метанотрофы (Dalal et al., 2008). CH_4 образуется в результате метаногенеза, который проходит в процессе разложения органического вещества в анаэробных условиях. В таких средах метаногены становятся преобладающей формой бактерий, они используют CO_2 вместо кислорода в качестве конечного метаболического акцептора электронов, высвобождая CH_4 в качестве побочного продукта (FAO, ITPS, 2015). Ключевым механизмом метаногенеза является ацетотрофия (Conrad, 1996). Среди метаногенов в пахотных почвах доминирует *Methylobacter vinelandii* и другие представители родов *Methylobacter* и *Methylomonas* (Кравченко и др., 2005). Оптимальные условия для метаногенной активности отмечаются при pH 5,0-7,5 (Chaban et al., 2006) и температуре 30–40°C (Le Mer, Roger, 2001). Ключевым фактором, определяющим будет ли почва

источником или стоком CH_4 , является уровень грунтовых вод; кроме того, на активность эмиссии CH_4 оказывают влияние содержание N, поскольку оно определяет секвестрационный потенциал почвы (Kane, 2015) и интенсивность диффузии кислорода к метаногенным микроразонам (Conrad, 2005).

Основным продуктом бактериального окисления CH_4 является CO_2 , в который переходит 60% ^{14}C - CH_4 (Кравченко и др., 2005). Метанотрофы могут потреблять более чем 90% CH_4 , образованного в почвах, при этом его окисление может происходить в слое почвы 0–60 см, но наиболее значительно – на глубине 4–18 см (Henckel et al., 2000; Klemedtsson, Klemedtsson, 1997; Roslev et al., 1997). Конкуренным ингибитором в окислении CH_4 выступает аммонийный азот (Saaria et al., 2004; Hütsch, 1998; Dunfield, Knowles, 1995).

Поглощение CH_4 почвой наиболее активно происходит при температуре 20°C и замедляется при повышении ее до 30°C и понижении до 0°C (Roslev et al., 1997; Sitaula et al., 1995; Castro et al., 1995). В среднем на долю почвы приходится 5,4% глобального стока CH_4 (Задорожный и др., 2010). Медиана скорости поглощения CH_4 используемыми в сельскохозяйственном производстве почвами составляет 0,017 мг C- CH_4 м⁻² ч⁻¹ (Le Mer, Roger, 2001). Потребление CH_4 в обрабатываемых почвах умеренной и субтропической зон идет со скоростью $0,013 \pm 0,007$ и $0,005 \pm 0,006$ мг C- CH_4 м⁻² ч⁻¹ (Kammann et al., 2009).

Связь циклов углерода и азота в почве. Биогеохимический цикл углерода тесно связан с циклом азота (N) (рис. 2). Внутрипочвенный азотный цикл включает в себя нитрификацию, денитрификацию, азотфиксацию, минерализацию, а также физико-химические процессы сорбции-десорбции аммонийного N. В приходную часть глобального азотного баланса входят поступление его с удобрениями и осадками. В расходную часть баланса входят отчуждение N с товарной частью урожая, потери при вымывании и эрозии, денитрификация, нитрификация и улетучивание аммиака, вынос и сжигание растительных и пожнивных остатков (Кудеяров, 1989). Из-за гетерогенности состава почвы процессы нитрификации и денитрификации могут протекать одновременно: нитрит и нитрат, продуцируемые нитрификаторами в аэробных

микроразонах почвы, утилизируются денитрификаторами, развивающимися в анаэробных микроразонах (Wrage et al., 2001). Способностью поглощать атмосферный азот обладают бактерии и некоторые высшие растения (Burns, Hardy, 1975).

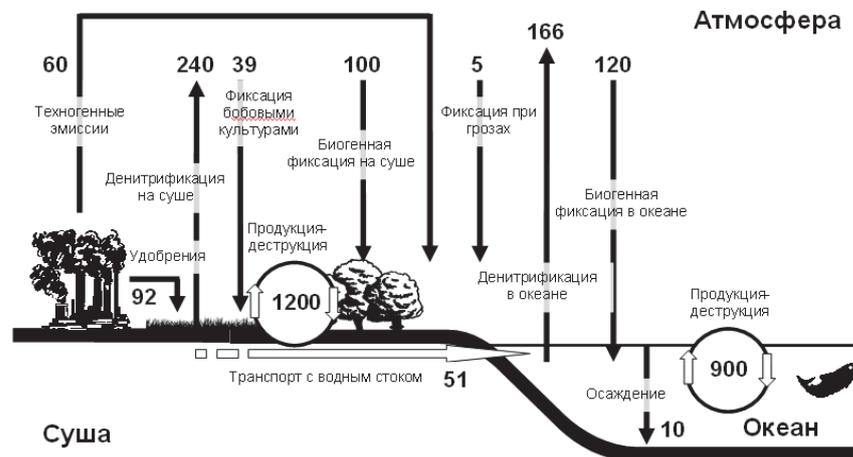


Рисунок 2. Современное состояние биосферного цикла азота, млн. т N год⁻¹ (Замолотчиков, 2013)

Интересно отметить, что в травяных экосистемах и почве для годового биогеохимического цикла N, как и некоторых других химических элементов, характерно отсутствие баланса (Базилевич, Титлянова, 1978; Базилевич, 1981). Вследствие вовлечения почв в сельскохозяйственное производство и внесения минеральных удобрений минерализационно-иммобилизационный цикл N нарушается (Семенов А.В. и др., 2004). Также в биомах с преобладанием сельскохозяйственного землепользования отмечаются наибольшие потери органического N, поскольку он выносится с товарной продукцией культур и только частично возвращается в почву в составе растительных остатков (Моисеев, Алябина, 2007).

Азотные удобрения имеют определяющее значение для оптимизации потребления макроэлементов и интенсификации продукционного процесса растений (Никитишен, Личко, 2011). По расчетам (Гавриленко, 2016), объем внесения азотных минеральных удобрений в мире ежегодно превышает 100 тыс. т

N, а по оценке (Ayres et al., 1994), за счет минеральных удобрений ежегодно в наземные экосистемы поступает около 90 млн. т N. Он используется растениями на 29,9-50,8% (Окорков и др., 2014) или 40-48% (Гейнак и др., 1998), что зависит от фазы развития растений, поскольку в основе формирования урожая лежит минерализация органических азотистых соединений (Цыгуткин, 1997).

Но часто количество иммобилизованного в органическую форму N удобрений не компенсирует величину расхода N почвы на вынос растениями и газообразные потери вследствие денитрификации (Кудеяров, 1999). И нередки случаи, когда при внесении удобрений увеличивается вынос N культурами, но баланс элемента в почве все равно остается отрицательным (Якименко, 2009).

Закись азота. Современное содержание азота в атмосфере оценивается в $3,9 \cdot 10^6$ млрд. т N, где он представлен в виде молекулярного азота и различных оксидов (Добровольский, 1998; Заварзин, 2004). Парниковый эффект N₂O за 100-летний период в 265 раз выше, чем у CO₂, а концентрация его в атмосфере устойчиво увеличивается со скоростью $0,73 \pm 0,03$ млрд⁻¹ год⁻¹ в течение трех последних десятилетий (IPCC, 2014).

В мире за год выделяется в атмосферу 17,7 млрд. т N в форме N₂O, из них 8,1 млрд. т N связано с антропогенными факторами, среди которых до 4,2 млрд. т N эмитируют в атмосферу сельскохозяйственные почвы, хотя подобные оценки остаются приблизительными из-за высокой вариабельности эмиссии N₂O из почв при использовании различных систем землепользования в разных странах (Бучкина и др., 2007).

По данным «Национальных докладов о кадастре...» (2009-2017), в России ведущим источником антропогенного выброса N₂O в атмосферу является аграрный сектор, в котором ключевая доля (около 61%) приходится на сельскохозяйственные земли, включая обрабатываемые торфяные почвы. Если в 1990 г. основной вклад вносил минерализованный азот (25%), то в последние годы ведущее место принадлежит выбросам от осушенных земель пашен и кормовых угодий (35%).

На долю абиотических процессов приходится 31–75% общей продукции

N_2O (Venterea, 2007). Вклад почвенной эмиссии из природных и сельскохозяйственных экосистем в глобальный бюджет атмосферного N_2O составляет от 57% (Mosier et al., 1998) до 60-70% (Conrad, 2002). Хотя в работе (Chapuis-Lardy et al., 2007) отмечены как выброс N_2O (нетто-эмиссия) со скоростью от 2,1 до 4400 $мкг м^{-2} ч^{-1}$, так и случаи отрицательной величины потока N_2O в системе почва – атмосфера (нетто-поглощение) с интенсивностью от $-0,0014$ до $-484 мкг м^{-2} ч^{-1}$. Сельскохозяйственные почвы начинают поглощать N_2O при повышенном ее содержании в воздухе (около 300 ppm) (Yu et al., 2008).

Период антропогенной эмиссии N_2O сельскохозяйственными землями страны составляет в среднем 140 дней, а коэффициенты эмиссии при внесении азотных удобрений на черноземах и дерново-подзолистых почвах равны 0,0126 и 0,0238 $кг N_2O-N кг N^{-1}$ соответственно (Романовская, 2000). По данным (Семенов В.М. и др., 2004), эмиссионные коэффициенты составили для N почвы $2,45 ± 0,69 кг N-N_2O га^{-1}$, для N минеральных удобрений – $0,788 ± 0,168 %$ от дозы.

В лесных почвах практически весь N_2O образуется в результате нитрификации и скорость его образования имеет прямую линейную зависимость от температуры, и, наоборот, в пахотных почвах при повышении температуры наблюдался рост эмиссии N_2O вследствие усиления денитрификации (Castaldi, 2000). В условиях изменяющегося климата, при повышении температур и частом выпадении ливневых осадков, вызывающих переувлажнение почвы, а также более частом чередовании процессов промерзания и оттаивания почв, возможно многократное усиление эмиссии N_2O , приводящее к резкому увеличению его потерь из пахотных почв (Hénault et al., 1998; Курганова, Лопес де Гереню, 2010).

1.2. Органическое вещество в почве

Цикл углерода. Биогенный цикл C состоит из потоков и пулов (рис. 3). Потоки формируются как эмиссия C, образующаяся при дыхании растений и разложении органического вещества. Процессы образования нового органического вещества и биомассы (гумус, листья и чистая первичная

продукция) представляют собой примеры поглощения С. К пулам изначально относили запасы С в почве и биомассе, включая живую биомассу (фитомассу) и растительный детрит (мортмассу, опад) (Kolchugina et al., 1995). Сейчас выделяют шесть пулов С, в том числе связанных с эмиссией ПГ: почвенный органический С ($C_{орг}$), надземная и подземная растительная биомасса, опад и отмершие части растений, а также отчуждаемая с урожаем биомасса (IPCC, 2006).



Рисунок 3. Биогеохимический цикл углерода, млрд. т С год⁻¹

(Смирнов, 2016, по материалам Diagram adapted from U.S. DOE, Biological and Environmental Research information System)

В 2003-2012 гг. глобальные потоки CO_2 составили, млрд. т С год⁻¹: сжигание ископаемого топлива $8,6 \pm 0,4$, глобальная концентрация в атмосфере $4,3 \pm 0,1$, сток в океан $2,5 \pm 0,5$, накопление в наземных экосистемах (основано на расчетных моделях) $2,8 \pm 0,8$, изменения землепользования (преимущественно обезлесение) $0,9 \pm 0,5$ (Le Quéré et al., 2014). В 2000-2009 гг. эмиссия CO_2 от землепользования и изменения землепользования была равна 1,10-1,17 млрд. т С год⁻¹ (Houghton et al., 2012). В конце XX в. поглощение антропогенного CO_2 практически равномерно распределялось между океаном и наземными экосистемами – $2,4 \pm 0,7$ и $2,9 \pm 1,1$ млрд. т С год⁻¹ соответственно (IPCC, 1990).

По другим данным, наземные экосистемы в 1990-е гг. поглощали от 2,0-2,5 (Ito, 2003) до 1,2-3,2 (Field, Raupach, 2004) млрд. т С год⁻¹. В настоящее время содержание CO₂ в атмосфере увеличивается ежегодно на 3,3 млрд. т С год⁻¹ (Lal, 2004).

Для вычисления изменения содержания углерода в наземных экосистемах $\Delta C(t)$ в работе (Friedlingstein et al., 2003) предложена зависимость (1), характеризующая в линейном приближении стимулирующее влияние CO₂ атмосферы на наземную растительность и взаимодействие климата и углеродного цикла:

$$\Delta C(t) = \beta \Delta CA(t) + \gamma \Delta T(t), \quad (1)$$

где $\Delta CA(t)$ – изменение концентрации CO₂ в атмосфере; $\Delta T(t)$ – соответствующее изменение глобально осредненной приповерхностной температуры воздуха; β и γ – диагностические коэффициенты, коэффициент β характеризует стимулирующий эффект CO₂ атмосферы, γ – взаимодействие климата и углеродного цикла.

Для оценки запаса $C_{\text{орг}}$ в почве (2) и его изменения (3) общепринятым является подход, разработанный IPCC (МГЭИК, 2006):

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{\text{REF},c,s,i} \cdot F_{\text{LU},c,s,i} \cdot F_{\text{MG},c,s,i} \cdot F_{\text{I},c,s,i} \cdot A_{c,s,i}), \quad (2)$$

где SOC_{REF} – эталонный запас углерода, т С га⁻¹; F_{LU} – коэффициент изменения запаса для систем землепользования или подсистемы конкретного землепользования; F_{MG} – коэффициент изменения запасов для режима управления; F_{I} – коэффициент изменения запасов для поступления органического вещества; A – площадь земли для оцениваемого слоя (страты), га; c – климатическая зона, s – тип почвы, i – комплекс систем хозяйствования, принятый в данной стране.

$$\Delta C_{\text{Mineral}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}, \quad (3)$$

где $\Delta C_{\text{Mineral}}$ – годовое изменение в запасах углерода в минеральных почвах, т С год⁻¹; SOC_0 – запас органического углерода почвы в последний год учетного периода, т С; $SOC_{(0-T)}$ – запас органического углерода почвы в начале учетного

периода, т С; Т – число лет учетного периода, год; D – временной промежуток, соответствующий коэффициентам изменения запасов углерода, который является периодом по умолчанию для перехода между равновесными значениями SOC, лет (обычно равен 20 годам).

Содержание углерода в почве. Углерод составляет 55-60% С по массе органического вещества почвы (FAO, ITPS, 2015). Слой почвы 0-100 см является мировым резервуаром почвенного органического углерода ($C_{орг}$), размер которого оценивается от 1500 млрд. т (IPCC, 1990) и 2000 млрд. т (Greenland, 1995) до 3000 млрд. т (The global carbon cycle, 2003). Если брать более точные оценки, то содержание $C_{орг}$ в метровом слое почвы составляет по последним данным 1062-1325 млрд. т (Köchy et al., 2015), 1408 млрд. т (Batjes, 2016), 1455 млрд. т (Shangguan et al., 2014), из них 495,8 млрд. т С – в мерзлотных органических и минеральных почвах (Tarnocai et al., 2009). В почвах России содержится 1/5 часть от мировых запасов почвенного С (Кудеяров, 2005), или 297,5 млрд. т (Nilsson et al., 2000), что в среднем составляет 100-300 т С/га (Орлов, Бирюкова, 1995).

На обрабатываемых землях агроэкосистем запас С составляет 150 (Puhe, Ulrich, 2012) – 167 (Jenkinson et al., 1991) млрд. т, при этом ежегодный его поток оценивается в $\pm 0,1$ млрд. т год⁻¹. Содержание С в пахотных почвах России широко варьирует в зависимости от типа почв (табл. 3) и природной зоны (табл. 4).

Относительное содержание органического углерода в почвах сельскохозяйственных угодий в среднем составляет 4,4%, варьируя от 0,66 до 28,7% (Семенов, Тулина, 2011). В средней полосе России в пахотном горизонте агросерых почв Московской, Тульской и Владимирской областей содержится 1,2-2,0% $C_{орг}$ (Исмагилова, 2010). Южнее количество $C_{орг}$ увеличивается и составляет в Тульской области (Александровка) 3,7% на южных склонах и 4,1% на северных, в Курской области (Грачева лощина) 3,5% и 3,6%, в Тамбовской области (Толмачи) 4,3% (Геннадиев и др., 2010). В глинисто-иллювиальном типичном тяжелосуглинистом среднемощном агрочерноземе Красноярской лесостепи под клевером и эспарцетом содержание углерода достигает 4,9-5,1% (Масяга, Власенко, 2015).

Таблица 3. Содержание углерода в пахотных почвах (Kolchugina et al., 1995)

Тип почвы	Содержание углерода, т С/га	Пул углерода, млрд. т С
Подзолистые	92,1	4,8
Заливные луга	145,3	0,6
Серые лесные	122,5	5,4
Черноземные	254,0	19,8
Каштановые	84,5	1,5
Солонцы	32,8	0,2
Серо-коричневые пустынные	35,1	0,3

Таблица 4. Среднее содержание органического углерода в подстилке и метровом слое пахотных почв по категориям земель, кг С/м² (Щепащенко и др., 2013)

Зона	Европейская часть	Азиатская часть	Россия в целом
Тундра	0,00	0,00	0,00
Лесотундра, редкостойная и северная тайга	10,59	9,27	9,75
Средняя тайга	34,65	13,65	18,95
Южная тайга	10,85	17,50	13,11
Смешанные леса	19,80	21,08	20,02
Степь	24,49	23,93	24,33
Полупустыни и пустыни	7,18	18,65	13,31
Среднее	22,19	22,50	22,28

Следует отметить, что часто в связи со специфическим водным режимом и отчуждением возделываемыми культурами содержание $C_{орг}$ с глубиной увеличивается. Так, на черноземах Курской области этот показатель от 3,2-3,4% в пахотном слое возрастает до 3,5-3,7% в подпахотном горизонте (Милановский и др., 2015). В Московской области в горизонте 0-15 см содержится 1,71% углерода

и 2,90% гумуса, при этом в нижележащем слое 15-30 см их значения увеличиваются до 2,34% и 3,90% соответственно (Гончарова, Телеснина, 2010). На пахотных почвах палеокриогенных комплексов Владимирского Ополья содержание C_{org} составляет 1,67-2,36 г С/100 г почвы на глубине 10 см и 1,62-2,61 г С/100 г почвы на глубине 20 см (Архангельская и др., 2008).

Фракции углерода. Среди первых работ, посвященных органическому веществу почвы, следует указать монографии Костычева (1886), Роде (1937), Тюрина (1937). В разные исторические периоды преобладали три парадигмы в учении о гумусе: агрономическая, почвенно-генетическая и экологическая, которые на современном этапе сформировали единую эко-био-физико-химическую концепцию (Когут, Семенов, 2015). С химической точки зрения гумусовые вещества делятся на гумусовые кислоты, куда входят фульвокислоты, гуминовые кислоты и их химические производные, и на их соединения, прочно связанные с глинистыми минералами и оксидами металлов, т.е. негидролизующий остаток (Иванов и др., 2009).

Существует несколько подходов к разделению органического вещества почвы на пулы. Самый распространенный среди них – деление на пул легкодоступных для разложения органических соединений (активный) и пул устойчивых к биодegradации гумусовых веществ (пассивный, или стабильный) (Титлянова, Чупрова, 2003). Критерием разграничения является время, необходимое для полного их разложения и новообразования: активный – от нескольких месяцев до нескольких лет, пассивный – до тысяч лет (Gougoulias et al., 2014). Легкоминерализуемые органические вещества представлены, в основном, фитодетритом и подвижными гумусовыми веществами, легко переходящими в растворимую форму (Ганжара, Борисов, 1997). Фитодетрит представлен мортмассой — это мелкие, частично гумифицированные надземные и подземные растительные остатки. Подвижные гумусовые вещества состоят из водорастворимых веществ специфической и неспецифической природы и гумусовых веществ, растворимых в слабой (0,1 н) щелочи (Чупрова, 2013).

В пахотном слое серой лесной супесчаной почвы содержится 3,15% гумуса,

из которых 1,29% приходится на активную форму и 1,86% на пассивную (отношение активной формы к пассивной составляет 0,69) (Муха и др., 2005). В пахотном черноземе обыкновенном малогумусном основная доля (98,9-99,6%) в общем пуле $C_{орг}$ приходится на стабильную фракцию, что в абсолютных величинах составляет 20,6 мг С/г почвы (на долю лабильного приходится лишь 0,24 мг С/г почвы) (Лопес де Гереню и др., 2009). В структурных агрегатах размером 1-3 мм черноземов типичных в слое почвы 0-10 см доли активного гумуса и пассивного равны 2,56% и 3,59% соответственно (Дегтярев и др., 2013). В составе минерализуемого органического вещества агрочерноземов юга Красноярского края доля подвижного гумуса достигает 69–77 %, что в свою очередь составляет 21–31 % от запасов $C_{орг}$ и варьирует в пределах 19–28 т С/га (Чупрова, 2013). В черноземе выщелоченном наиболее значительно представлена фракция лабильного гумуса (в среднем по севооборотах 3890 мг С/кг почвы или 10,3% от $C_{орг}$), далее следует фракции детрита (соответственно, 1546 и 4,1) и мортмассы (627 и 1,7) (Шарков и др., 2014). В каштановых почвах сухостепной зоны соотношение легкоминерализуемой и трудноминерализуемой фракции $C_{орг}$ составляет 1,6%:21% на целине (всего 190 мг С /100 г почвы) и 1,6%:9% на залежи (всего 99 мг С/100 г почвы) (Кузнецова и др., 2013).

Второй подход к разделению почвенного органического вещества – на три фракции: активный, медленный (промежуточный) и пассивный пулы, или, другими словами, легко минерализуемая, умеренно минерализуемая и трудно минерализуемая фракции (Цыбулько и др., 2010). Их доли в гумусовом горизонте дерново-подзолистой супесчаной почвы составляют соответственно 6-11%, 34-65% и 26-94% от всего $C_{орг}$ (Когут и др., 2016). По данным (Muller, Норер, 2004; Schwendenmann, Pental, 2008), на долю активного пула органического вещества почвы в слое почвы 0-20 см приходится от <1 до 8% от всего $C_{орг}$, в медленном пуле сосредоточено от 35 до 72%, в устойчивом пуле – от 39 до 64%.

Также гумусовые вещества можно разделить на четыре группы (Иванов и др., 2009): легкоразлагаемое органическое вещество (1,5% от $C_{орг}$) – второй после корней источник эмиссии CO_2 в атмосферу; лабильный биоактивный гумус (26%

от $C_{\text{орг}}$) – формирует многолетнюю динамику почвенного органического вещества; стабильный биоактивный гумус (22% от $C_{\text{орг}}$); относительно биоинертный гумус (42% от $C_{\text{орг}}$) – пассивный пул органического вещества.

Преобразование углерода в почве. Органическое вещество в почве постоянно подвергается различным преобразованиям, протекающим одновременно, основными из которых являются его перераспределение между фракциями, минерализация и новообразование гумуса (Галицкий, Комаров, 1977; Орлов, 1990). Например, на дерново-подзолистой супесчаной почве Ярославской области в зависимости от особенностей применения удобрений интенсивность минерализации гумуса составляет 81,3-112,8 ц/га, тогда как гумусообразование идет со скоростью 91,0-115,9 ц/га (Исаичева, Труфанов, 2015). Минерализационная способность органического вещества почвы колеблется от 4,3 % от $C_{\text{орг}}$ на выщелоченных черноземах и темно-каштановых почвах до 8,9-11,1 % на серых лесных и дерново-подзолистых и 30,3% на тундровых почвах (Семенов и др., 2008).

Решающее влияние на скорость разложения органического вещества оказывает температура (Reichstein et al., 2005). Но кроме климатических, гидрологических, геоморфологических, почвенных, фито- и зоогеографических факторов функциональных звеньев, под влиянием которых осуществляется обмен веществом и энергией в естественных ландшафтах (Григорьев, 1966; Черкашин, Бибаева, 2013), в агроландшафтах действует еще антропогенные компоненты.

Углеродный режим пахотных почв формируется под влиянием агроэкологических факторов: длительной распашки, недостаточного поступления органического вещества с растительными остатками, многолетнего возделывание монокультуры и, как следствие, уменьшения гумусированности пахотного горизонта и функциональной активности микробиоты (Марковская и др., 2014). К этому можно добавить интенсивную обработку, применение минеральных и отсутствие органических удобрений, недостаточно научно обоснованные приемы мелиорации, развитие эрозионных и дефляционных процессов (Косолапов и др., 2015).

Почвы, которые становятся пахотными, теряют от 24% (Kolchugina et al., 1995) до 1/2-2/3 исходного количества углерода со средней скоростью 30-40 т С/га (Lal, 2004). Так, в среднем в России за 1991-1999 гг. для слоя пахотной почвы плотностью 1,32 г/см³ и глубиной 20 см потери составили 0,0187% или 0,493 т С/га (Романовская, Карабань, 2007). Хотя в пахотных почвах их абсолютные значения меньше, чем в целинных (Чимитдоржиева, 2010).

В обрабатываемых почвах существенно снижается содержание микробной биомассы (Авксентьев, 2011), устойчивость микробных сообществ и их метаболический коэффициент (Гончарова, Телеснина, 2010). Корреляции между содержанием гумуса и суммарной относительной активностью гидролитических ферментов ослабляются (Гедгафова и др., 2015).

Агроценозы являются экосистемами, характеризующимися наиболее динамичным и неустойчивым балансом органического вещества (Ларионова и др., 2010). В пахотных почвах содержится в 1,9–3,9 раза меньше потенциально-минерализуемого углерода, чем в почвах естественных угодий, а минерализуемость органического вещества не превышает 2,3–6,2% от С_{орг} даже при оптимальных условиях температуры и влажности (Семенов и др., 2008).

Часто в верхнем пахотном слое почв в связи со специфическим водным режимом и отчуждением возделываемыми культурами наблюдаются большие годовые амплитуды содержания С_{орг}. Так, в пахотном горизонте дерново-подзолистых суглинистых почв Смоленской области сезонные изменения запасов углерода гумусовых веществ за год составили 6,3 т/га, что соответствует 11,4% от максимальных запасов углерода гумуса почвы, а за два года – 11,3 т/га и 20,4% соответственно (Хохлов, 1980). Для пахотной подзолистой супесчаной почвы Кировской области от начала к концу сезона отмечен тренд уменьшения углерода лабильных соединений примерно от 0,16 до 0,11% (Шихова, Лисицын, 2014).

Управление углеродным режимом пахотных почв с помощью изменения структуры севооборотов более эффективно, чем с помощью изменения доз органических и минеральных удобрений, что особенно актуально для Нечерноземной зоны как наиболее перспективной для осуществления

адаптационных мер к ожидаемым изменениям климата, при условии периодической корректировки адаптивных стратегий во времени (Романенков, 2010). Возделывание многолетних бобовых трав и размещение их в структуре сельскохозяйственных угодий является одним из традиционных способов восполнения запасов органического вещества в почвах, и повышения плодородия почв в целом (Власенко, 2012). Наиболее эффективным способом увеличить запасы С является залужение, когда среднегодовое накопление углерода достигает 106-128 г С/м² и в слое 0-60 см его запасы увеличиваются в 1,6-1,7 раза в течение 24 лет (Ларионова и др., 2009). Введение в севооборот овощных культур позволяет повысить содержание углерода в черноземной почве не менее чем на 26 т С/га (Medinets et al., 2014).

Использование минеральных удобрений обеспечивает сохранение органического вещества, накопление трансформируемого и подвижного углерода (Завьялова и др., 2013). Но минеральные удобрения не оказывают влияния на обеспеченность почвы органическим веществом, тогда как органические удобрения дают прирост его содержания на 216-350 мг на 1 т азота, внесенного с навозом. При этом, увеличение содержания в серой лесной почве подвижной и растворенной фракций органического вещества на 100 и 10 мг С/100 г эквивалентно увеличению размеров активного пула на 30-80 и 23-74 мг С/100 г соответственно (Зинякова, 2014). При внесении органических удобрений содержание С_{орг} в пахотном горизонте дерново-подзолистой супесчаной почвы под овощным севооборотом увеличивается от 17,0 до 32,0 г С/кг почвы, в полевом севообороте – от 14,1 до 22,4 г С/кг почвы, а в подпахотном горизонте от 14,3 до 31,9 г С/кг почвы (Бойцова и др., 2015). В неудобряемой дерново-подзолистой супесчаной почве содержание С_{орг} увеличилось от исходного 1,28% до 1,32-1,53% при внесении различных сочетаний минеральных и органических удобрений (Когут, Семенов, 2015).

Накопление гумуса идет наиболее интенсивно при комбинировании внутрипочвенного внесения гранулированных удобрений на границу пахотного и подпахотного горизонтов, а жидких – на глубину корнеобитаемого слоя почвы

(Шевцов, 2015). И наоборот, отсутствие систематического внесения органических удобрений приводит к уменьшению содержания потенциально-минерализуемого углерода (Семенов, Тулина, 2011).

При интенсификации сельскохозяйственного использования происходит переход гумуса из прочносвязанного состояния в более активные формы за счет накопления агрегированных илов и уменьшения доли прочносвязанной подфракции ила (Безуглова, Юдина, 2006). Так, на дерново-подзолистой супесчаной почве экспериментальной базы им. Суворова Минской области Республики Беларусь относительное содержание подвижных гумусовых веществ повышалось от 35,0% от общего С почвы в неудобренном варианте до 40,5% при внесении удобрений, одновременно увеличивалось и содержание подвижного гумуса на 718-1826 мг/кг почвы или 2,1-12,2% (Богатырева и др., 2013).

Поглощение углерода. Моделирование изменение концентрации CO_2 на рубеже XX-XXI вв. показало широкий разброс его стока в наземных экосистемах от 1,4 до 8,6 млрд. т С/год, а с учетом климатических изменений – уменьшение стока углерода на уровне 0,3-6,6 млрд. т С/год (Cramer et al., 2001). По мнению большинства исследователей, территория России является стоком углерода, ежегодное накопление которого в растительном покрове превосходит его промышленную эмиссию и эмиссию вследствие землепользования (Моисеев, Алябина, 2007; Kurganova et al., 2014).

Образующийся в почве CO_2 преимущественно выделяется в атмосферу, однако некоторая его часть подвергается биотической и абиотической фиксации. Основные абиотические механизмы внутрипочвенного связывания CO_2 – это растворение, сорбция, выпадение карбонатов, защемление в микропорах (Смагин, 2000). Среди биотических факторов, влияющих на накопление углерода в почве следует отметить, что способностью ассимилировать CO_2 наряду с автотрофными бактериями (фототрофы, метаногены, ацетогены, нитрификаторы), также обладает широкий спектр анаэробных и аэробных гетеротрофных микроорганизмов, включая бактерии и грибы (Miltner et al., 2005; Šantrůčková et al., 2005).

Секвестрация углерода в почве связана, главным образом, с илистой фракцией, а основным минералом, связывающим органический углерод, является кварц (Бойцова и др., 2015). По расчетам ФАО, возможно поглощение почвой до 4,8 т углерода в год (Канамару, 2009), среди прямых положительных эффектов этого явления – улучшение качества почвы, повышение эффективности землепользования, смягчение климатических изменений. Также это позволит увеличить биоразнообразие и будет способствовать накоплению почвенной влаги.

В торфяных почвах летом основной поток углерода направлен по градиенту температур в нижние слои почвенного профиля, при этом в атмосферу поступает лишь 10-12% от общей его эмиссии (Зайдельман и др., 1996). Так, темновая фиксация CO_2 в сельскохозяйственной почве Джорджии (США) составляла от 0,2 до 4,8 $\text{мг м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ в зависимости от сезона, составляя за год 15 г С/м^2 , и положительно коррелировала с почвенной температурой и выделением CO_2 (Shimmel, 1987). В посевах ячменя в Огайо (Канада) секвестрация углерода была равна 0,4 $\text{т С га}^{-1} \text{год}^{-1}$ (Abohassan, 2004). Для агроценозов Минусинской впадины аккумуляция углерода в продукции составляла 2,7 $\text{т С га}^{-1} \text{год}^{-1}$, а поступление углерода за счёт продукции в среднем за 30-летний период колебалось от 3,3 $\text{т С га}^{-1} \text{год}^{-1}$ в агроценозах лесостепи до 2,4 $\text{т С га}^{-1} \text{год}^{-1}$ в степи и сухостепи (Донская, 2004).

1.3. Потоки CO_2

Образование CO_2 . Эмиссия CO_2 из почв, или почвенное дыхание, формируемая дыханием корней и микробным разложением органического вещества почвы, отмерших растительных остатков и органических веществ, продуцируемых вегетирующими корнями, а также, в меньшей степени, дыханием животных, является, вместе с потоком из океана, одним из двух главных путей поступления CO_2 в атмосферу (Кузюаков, 2006; Степанов 2011) (рис. 4). С точки зрения терминологии, понятия «дыхание почвы» и «эмиссия почвой углекислого газа» эквивалентны друг другу.

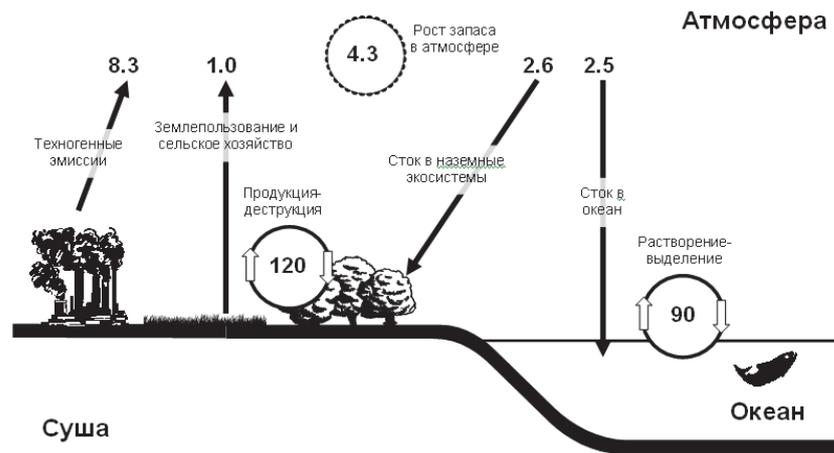


Рисунок 4. Современное состояние биосферного цикла диоксида углерода, млрд. т С год⁻¹ (Замолотчиков, 2013)

CO₂ образуется преимущественно вследствие автотрофного и гетеротрофного дыхания растений D_p и дыхания микроорганизмов D_m . Валовое дыхание экосистемы D_g (4) эквивалентно общей экосистемной эмиссии CO₂ и равно сумме надземного D_n и почвенного дыхания D_p . При этом дыхание почвы представляет собой сумму корневого D_k и микробного дыхания (Luo, Zhou, 2006).

$$D_g = D_n + D_p = D_n + D_k + D_m \quad (4)$$

Баланс CO₂ в экосистеме, или обмен CO₂ между экосистемой и атмосферой, характеризуется через чистый экосистемный обмен NEE (Net Ecosystem Exchange), т.е. соотношение фотосинтеза и суммы почвенного и надземного автотрофного дыхания, и описывается уравнением сохранения массы (5):

$$NEE = GPP - Re, \quad (5)$$

где GPP – первичная брутто-продуктивность растительности (Gross Primary Production), фактически фотосинтез; Re – дыхание экосистемы, т.е. скорость окисления органических продуктов всей биотой (Мониторинг потоков, 2017; Чебакова и др., 2014).

Основными источниками поступления CO₂ в атмосферу являются органическое вещество почвы; отмершие растительные остатки в почве и на ее поверхности; органические вещества, продуцируемые вегетирующими корнями (экссудаты, секреты, отмирающие ткани корней). Среди путей образования CO₂

в почве отмечают дыхание корней и микробное разложение органического вещества почвы – в свободных от корней и растительных остатков зонах почвы (базальное дыхание), в смежных с корнями и растительными остатками зонах почвы (ризосферный прайминг-эффект), ризодепозитов живых корней (ризомикробальное дыхание), мертвых растительных остатков (Kuzyakov, 2006). 75% почвенной эмиссии CO_2 дает верхний слой почвы 0–20 см, хотя размеры эмиссии CO_2 пропорциональны его концентрации в слое 0–50 см (Jassal et al., 2005). Дыхание животных (прежде всего, дождевых червей) составляет не более 5% потока CO_2 из почвы (Заварзин, Кудеяров, 2006).

Ранее (Костычев, 1949; Наумов, 2009) было определено, что выделяющийся с поверхности почвы CO_2 служит интегральным показателем ее биологического состояния, по которому судят об энергетике трансформационных процессов и плодородии. В более поздней трактовке интенсивность эмиссии CO_2 почвой интерпретировалась как интегральная функциональная характеристика, отражающая физиологическую активность почвенной микрофлоры (Хазиев, 1982). Наиболее информативным показателем биологической активности почв является активность ферментов класса оксидоредуктаз, которая, в свою очередь, зависит от способа обработки почвы (Марковская и др., 2014), а внутрипочвенные физические факторы оказывают более значимое воздействие на биологическую активность, чем состояние субстрата (Семенов и др., 2009).

Поток CO_2 характеризуется высокой временной и пространственной неоднородностью. Наиболее существенное влияние на величину эмиссии CO_2 из почв оказывают климатические условия, характеристики почвы и растительного покрова (Курганова и др., 2011; Chen et al., 2014) (рис. 5), а также концентрация кислорода в корневой зоне (Chen et al., 2010). В пределах одной экосистемы его величина в значительной степени определяется температурой и влажностью почвы (Наумов, 2004; Moyano et al., 2013). Наиболее стабильным показателем, характеризующим эмиссию CO_2 из почв, является его суммарная летняя эмиссия, зависящая при этом от количества осадков, особенно весенне-летнего периода, и обратно пропорциональная среднегодовой температуре воздуха (Курганова,

2010). Но повышенная влажность почвы (более 60% полной влагоемкости) способствует снижению показателей эмиссии CO_2 (Пуртова и др., 2013). Для почв торфяников северной тайги и лесотундры определяющее значение для эмиссии CO_2 имеют глубина залегания многолетнемерзлых пород и мощность сезонноталого слоя (Бобрик, 2016). На примере озимой пшеницы и кукурузы было доказано (Zhao et al., 2004), что обработка почвы, в частности глубокая вспашка, в среднем на 30% увеличивает интенсивность дыхания почвы, также как и азотные удобрения (Morell et al., 2012).



Рисунок 5. Связь потоков CO_2 с климатическими изменениями (Bardgett, 2011)

Количественные оценки эмиссии CO_2 . Дыхание почв мира сейчас оценивается в 60-100 млрд. т С год⁻¹ (Смирнов, 2016; Raich et al., 2002) и за последние четыре десятилетия увеличивается в связи с потеплением климата в среднем на 0,1 млрд. т С год⁻¹ (Bond-Lamberty, Tompson, 2010). При этом вклад землепользования в этот прирост постоянно возрастает (рис. 6).

Дыхание почвы дает около 30% глобальной эмиссии CO_2 (Задорожний и др., 2010), что эквивалентно 4% общих запасов С в почвах мира, из них не более 1/10 формируется от антропогенной деятельности (Заварзин, Кудеяров, 2006). Эмиссия

CO₂ из почвы чрезвычайно изменчива в пространстве и времени, и суточные ее значения в различных агроэкосистемах могут различаться почти в 100 раз: от 0,4 г С м⁻² сут⁻¹ в зимний период в горных районах Тибета (Shi et al., 2006) и 14,46 г С м⁻² сут⁻¹ в посевах сои в Небраске, США (Da Costa, 1983), до 30,4 г С м⁻² сут⁻¹ в агроценозах зерновых культур в умеренном поясе Забайкалья (Малханова и др., 2011) и 37,5 г С м⁻² сут⁻¹ летом в посевах кукурузы в субтропиках Айовы, США (Parkin et al., 2005).

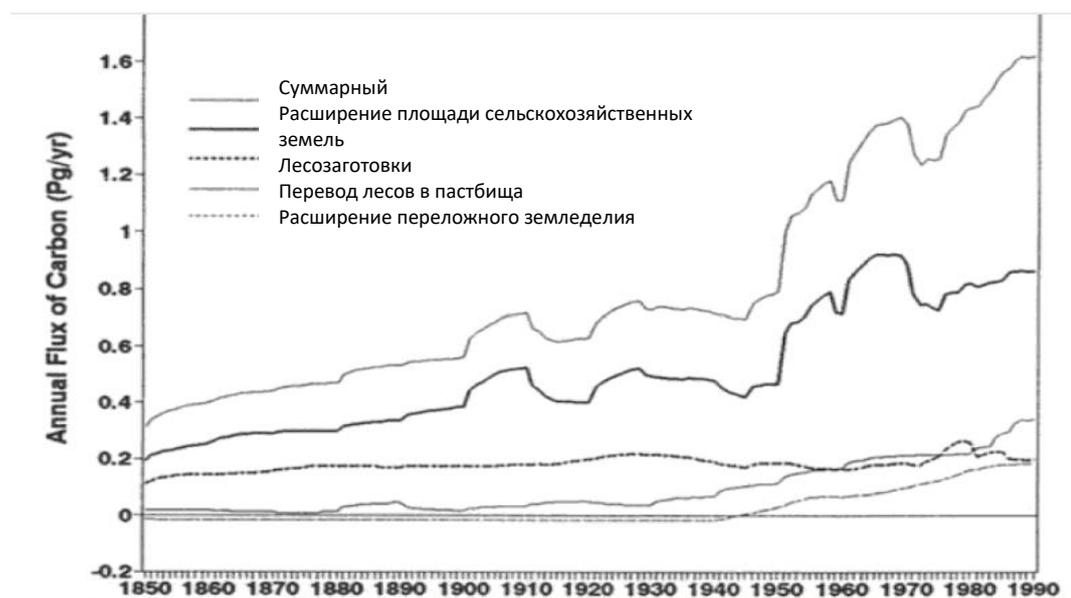


Рисунок 6. Годовые потоки углерода в атмосферу от различных типов землепользования (Houghton, 2007)

В России дыханию почвы принадлежит более 80% от общей эмиссии CO₂, (Задорожный и др., 2010). В 1996-2002 гг. вклад почвенного покрова России был равен 782 млн. т С год⁻¹, при этом крупнейшими источниками CO₂ были промышленное производство, сельское и лесное хозяйство, лесные пожары и гибель лесов вследствие поражения вредителями и болезнями (Заварзин, Кудеяров, 2006). По современным оценкам, почвенный покров России, занимающий 11,7% суши планеты, эмитирует в атмосферу 6,3% глобальной почвенной эмиссии CO₂, при этом интенсивность общего, микробного и корневого дыхания равна 5,56, 2,78 и 2,89 млрд. т С год⁻¹ соответственно (Пулы и потоки, 2007).

Низкая удельная эмиссия CO₂ из пахотных почв России в 1990-1999 гг.,

равная $0,5 \pm 0,1$ т С/га и связанная с сокращением поступления в них углерода, и, прежде всего, уменьшением использования органических удобрений, увеличилась в 2000-2005г. до $0,8 \pm 0,1$ т С/га (Романовская, 2008б). В Западной Сибири в деструкционные процессы вовлекается ежегодно 2040 кг С/га растительных остатков, а ежегодный суммарный минерализационный поток и отчуждение с урожаем равны 2235 кг С/га (Донская, 2004). В Приобье потери углерода из парующего выщелоченного чернозема с дыханием за вегетационный период составляют от 1967 до 3701 кг С га⁻¹ год⁻¹ в зависимости от поступления растительных остатков пшеницы и покровных культур (Власенко и др., 2009). В Приморье на основе абсорбционного метода было установлено, что на участках возделывания бобовых трав (клевер, люцерна, донник) на агротемногумусовых глеевых почвах по сравнению с посевами сои потери СО₂ выше, прежде всего, из-за минерализационных процессов в результате деятельности микрофлоры и ферментативной (каталазной) активности, и составляют 0,67 и 0,39 г С–СО₂ м⁻² сут⁻¹ соответственно (Пуртова и др., 2013).

В работе (Parkin, Kaspar, 2003) установлена суточная динамика эмиссии СО₂ из почвы под растениями. Максимальное выделение, как правило, фиксируется во второй половине суток (с 12 до 22 ч), минимальное зарегистрировано в ночные часы (с 2 до 6 ч), а близкое к среднесуточному наблюдается в 9-10 ч. Внутрисуточные изменения величины дыхания почвы составляют, как правило, 25–43% от среднесуточной, а пики изменения температуры почвы и продуцирования СО₂ отличались на 1–3 ч.

Сезонная динамика эмиссии СО₂ рассматривалась на примере еловых насаждений (Машика, 2005): минимальные ее значения отмечались весной после схода снега, затем наблюдалось постепенное увеличение до 10 раз по сравнению с первоначальным, достигавшее максимума в июле-августе, и постепенное снижение к концу вегетации, параллельно ходу температуры почвы и в обратной зависимости от ее влажности.

Микробное и корневое дыхание. Каскад «растение-микроорганизмы-почва» играет ведущую роль в образовании обратных связей цикла углерода и

регулировании реакции экосистем на изменения климата (Bardgett, 2011). Содержание микробной биомассы зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить на основные (содержание и почве физической глины и органического вещества) и вторичные (температура, влажность, содержание минеральных элементов и загрязнение) (Орлова, 2013).

Абсолютные значения содержания микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) в пахотных почвах составляют по различным оценкам: 163 мг С/кг в посевах хлопка на хорошо дренированной супесчаной почве на юге США (Lee, Jose, 2003), 140 мг С/кг (Благодатский, Благодатская, 1996) или 220-315 мкг С/г почвы (Карелин и др., 2017а) в серой лесной пахотной почве на территории опытно-полевой станции в окрестностях г. Пущино, 356-374 мкг С/г в дерново-подзолистой (Архангельская, Тверская и Калужская области) и серой лесной (Московская и Калужская области) почвах, причем 59-87% представлено эукариотными грибами (Ананьева, 2007). Наибольшее количество микробной биомассы и запасы углерода в ней отмечаются в почвах под травянистой растительностью: 1568 мг/кг почвы или 3,3 т С/га (Глазунов и др., 2016).

В мировом масштабе микробное дыхание (почва + опад) за 1990-1999 гг. оценивается в 61,5 млрд. т год⁻¹ (Ito, 2003). На территории России в 1990-е гг. микробное дыхание в среднем было равно 2,8 млрд. т С год⁻¹, т.е. 2/3 от суммарной эмиссии CO₂ с учетом холодного периода (Кудеяров и др., 1995). В настоящее время гетеротрофное дыхание российских пахотных почв составляет 330,4 млн. т С год⁻¹ (Dolman et al., 2012; Shvidenko et al., 2010), а в средней полосе его интенсивность составляет 0,39-0,68 мкг CO₂-С г⁻¹ почвы ч⁻¹ (Ананьева, 2007).

Соотношение $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ в почвах естественных экосистем по сравнению с пахотными почти в три раза больше (Стольников, 2010). Кроме того, устойчивость микробных сообществ, характеризуемая метаболическим коэффициентом, в пахотных почвах значительно ниже по сравнению с лесными и луговыми фитоценозами (Гончарова, Телеснина, 2010).

Доля дыхания корней может варьировать в широких пределах (табл. 5) и по различным оценкам составлять 18-50% (Сапронов, Кузяков, 2007), 30-40%

(Кузяков, Ларионова, 2006; Курганова, 2010; Chen et al., 2014), 35-57% (Евдокимов и др., 2010), 50-60% (Заварзин, Кудеяров, 2006; Hanson et al., 2000). Доля микробного дыхания равна примерно 70% (Пулы и потоки, 2007) и, например, для дерново-подзолистых почв южно-таежных экосистем составляет 60,6 (метод интеграции компонентов) – 69,1 (субстрат-индуцированное дыхание) % (Карелин и др., 2017б). Хотя, по мнению (Larionova et al., 2006), количественные характеристики дыхания почвы сильно зависят от метода определения, и наиболее точно определить вклады корневого дыхания и дыхания микроорганизмов можно только с помощью метода субстрат-индуцированного дыхания (Ларионова и др., 2006).

На дыхание корней оказывают влияние такие факторы как продолжительность периода вегетации, а также активность ассоциированных с корнями ризосферных микроорганизмов (Заварзин, Кудеяров, 2006), а само оно является главным механизмом регулирования теплового баланса растения (Rachmilevitch et al., 2006).

Соотношение потоков CO_2 в агроландшафтах между собой многократно оценивалось. Так, по результатам измерения камерным методом (Suleau et al., 2011) в посевах озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы преобладает автотрофное дыхание (60-90%), а в нем, в свою очередь, надземный компонент (60-80%), тогда как доля гетеротрофного дыхания почвенных микроорганизмов чрезвычайно мала. По оценке (Kolchugina et al., 1995), дыхание микроорганизмов составляет от 44 до 52% (в среднем 48%) от фотосинтеза, а корневое дыхание эквивалентно трети дыхания микроорганизмов. Также было рассчитано (Sadras, Calderini, 2009), что потери углерода при дыхании корней могут составлять 25% от уровня фотосинтеза и 13,5% от общего веса растений. По данным (Rees et al., 2005), при совокупном дыхании почвы 4-26 т С/га вклад корней в формирование органического углерода почвы составляет 0,1-2,8 т С/га в зависимости от особенностей обработки, дренажа, скашивания и внесения удобрений.

Таблица 5. Доля дыхания корней в общей эмиссии CO₂ почвами агроценозов

Регион	Метод	Культура	Доля дыхания корней	Источник
Пушино	Субстрат-индуцированное дыхание	Пшеница	10-58%, в среднем 33%	Ларионова и др., 2003
Китай	Газовая хроматография	Пшеница	64%	Sun et al., 2004
		Рис	77%	
Нидерланды	Импульсное мечение ¹⁴ C	Пшеница и ячмень	89-95% в фитокамере, 75% в поле	Swinnen, 1994
Лабораторный опыт	Раздельная инкубация	Кукуруза	8-32%	Сапронов, 2008
Лабораторный опыт	Краткое ингибирование микробного дыхания	Кукуруза	16-24%, может достигать 94%	Helal, Sauerbeck, 1991
Вегетационный опыт	Меченые изотопы ¹³ C,	Овес	61-92%, включая долю дыхания ризосферных микроорганизмов (4-23%)	Евдокимов и др., 2007
Небраска, США	Камерный	Люцерна	63%	Da Costa, 1983
		Соя	7-13%	
Финляндия	Изотопный метод (¹³ C)	Двукосточник (камыш)	Не более 50%	Biasi et al., 2012
Пушино	Субстрат-индуцированное дыхание в поле	Луг	41-50%	Евдокимов и др., 2010
	Субстрат-индуцированное дыхание в лаборатории		35-40%	
	Раздельное инкубирование корней и почвы		42-57%	
—	—	Все типы	8-19%	Сапронов, Кузяков, 2007

1.4. Моделирование цикла углерода

Моделирование почвенных процессов. Статистическая обработка и построение математических моделей широко распространены в различных отраслях наук о Земле (Белюченко и др., 2015).

Модели – структурированные имитации характеристик и механизмов системы, позволяющими воспроизводить появление или функционирование систем. Математические модели сводят воедино многие переменные и связи (часто в виде компьютерного кода) для имитации функционирования и показателей эффективности систем при разных параметрах и вводимых ресурсах (МГЭИК, 2014). Имитационная биогеохимическая модель – программно реализованная совокупность алгоритмов, описывающих комплекс процессов, протекающих в системе «почва – растительный покров – атмосфера» (Полуэктов и др., 2011). Модели оформляются в виде исполняемого программного файла и преобразуют совокупность входных данных в выходные показатели, характеризующие ход и результат рассматриваемого процесса. Процесс создания модели завершается оценкой чувствительности ее параметров к варьированию исходных данных и верификацией (Blagodatsky et al., 1998; Blagodatsky, Richter, 1998). В дальнейшем модели позволяют проводить компьютерные эксперименты, заменяя собой реальные объекты исследования (Припутина и др., 2016).

Модели влияния различных факторов на динамику запасов и потоков элементов в биосфере и в отдельных экосистемах начали активно развиваться в последние три десятилетия (Golubyatnikov, Svirezhev, 2008; Komarov et al., 2003; Schlesinger, 1991; Tonitto, Powell, 2006; Venevsky, 1994; Тарко, 2002). На начальном этапе создавались физико-математические модели углеродного цикла без учета влияния на него круговоротов других биогенных элементов (Eliseev, Mokhov, 2007; Golubyatnikov et al., 1998; Krapivin, 1993; McGuire et al., 2001; Zavalishin, 2008; Комаров и др., 2006). Современные модели включают в себя концептуальные имитационные модели биогеохимических циклов азота, углерода, фосфора и серы, а в их основе лежит блоковый подход: исследуемая

система представляется в виде схемы из нескольких блоков и связывающих их потоков, описываемых функциональными зависимостями, количество которых зависит от цели исследования.

На сегодняшний день Международный консорциум по почвенному моделированию, International Soil Modeling Consortium (ISMC), составил список из 33 лучших моделей, которые наиболее оптимально отражают почвенные процессы (табл. 6): AgroC, APEX, BASFOR, CANDY, CNMM, COP-Soil, CoupModel, CRITERIA, DAISY, DEMENT, DIDAS, DNDC, ECOSSE, EPIC, Expect-N, Hydrus, MAD#, MONICA, MOSAIC, MOTOR, ORCHIDEE, RootBox, RothC, R-SWMS, Saltirsoil_M, SiSPAT-Isotope, SoilGen, SPACSYS, SPOTPY, STANMOD, SWAP, VSoil Platform, WAVE.

Модели, использующиеся для оценки составляющих углеродного баланса, можно разделить на несколько групп (Солодянкина, Черкашин, 2011):

- в зависимости от выполняемых функций: модели динамики геосистем, модели регулирования, факторальные модели, модели клеточных автоматов, модели классификации, модели комплексов;
- в зависимости от масштаба анализируемых объектов: планетарные, материковые, региональные, локальные, экосистемные, отдельных компонентов экосистемы.

Наиболее распространены среди них глобальные и экосистемные.

Модели экосистем. На сегодняшний день создано множество моделей биогеохимического цикла азота. Среди них, например, математическая модель динамики N в фитомассе, детрите и почве локальной травяной экосистемы при различных уровнях внесения азотных удобрений (Reuss, Innis, 1977), а также программный модуль трансформации, переноса и поглощения N в почве (Полуэктов, Терлеев, 2010). Интересно, что модели для оценки потоков N на суше развиваются с учетом их связей с морскими экосистемами (Sarmiento et al., 1993; Ryabchenko et al., 1998; Kishi et al., 2007).

Таблица 6. Сравнительная характеристика почвенных моделей (по материалам ISMC)

Название	Область знаний							Слой почвы				Масштаб				Размерность			Круговорот		Эмиссия парниковых газов			
	Гидрология	Физика почв	Почвообразование	Сельское хозяйство	Биогеохимия	Взаимодействие растений - почва	Физология растений	Поверхность	Верхний горизонт	Ризосфера	Ксильмный поток	Почвенные агрегаты	Участок, поле	Район	Регион	Глобальные	1D	2D	3D	Углерод	Азот	CO ₂	CH ₄	Оксиды азота
AgroC				x	x				x								x			x				
APEX				x				x					x	x				x						
BASFOR					x	x		x									x			x	x	x		x
CANDY				x	x				x										x	x	x	x		x
CNMM				x	x			x							x				x	x	x	x	x	x
Cop-Soil				x	x				x								x			x				
CoupModel	x	x				x		x							x				x					
Criteria	x	x		x	x	x			x										x					
DAISY		x			x				x										x		x	x		x
DEMENT					x				x										x		x	x		
DIDAS	x	x				x			x									x						
DNDC					x				x										x	x	x			x
ECOSSE				x	x				x										x	x	x	x		
EPIC				x					x										x					
Expect-N				x					x										x					x
Hydrus	x	x				x			x									x	x	x				
MAD#	x							x											x					
MONICA				x					x										x	x	x			x
MOSAIC					x				x										x		x			
MOTOR					x				x										x		x			
ORCHIDEE	x				x		x								x	x			x			x		
RootBox							x			x									x					
RothC					x				x										x			x		
R-SWMS						x					x								x					
Saltirsoil_M	x	x				x			x										x					
SiSPAT-Isotop					x	x			x										x					
SoilGen			x					x											x					
SPACSYS					x				x										x		x			x
SPOTPY	x				x				x										x					
STANMOD	x	x				x			x										x					
SWAP	x	x				x		x	x										x					
VSoil Platform		x			x				x										x					
WAVE				x					x										x					

Для оценки эмиссии N_2O созданы специализированные регрессионные и процессные уравнения (Bouwman, 1996; Freibauer, Kaltschmitt, 2003; Roelandt et al., 2005), модели ExpertN (Baldioli et al., 1994), CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach, Метод Карнеги-Эймса-Стэнфорда (Potter et al., 1993, 1996), DAY-CENT (Day and Century, День и век) (Del Grosso et al., 2000), модели на базе AGROTOOL, учитывающие разложение органического вещества, поглощение азота из почвы корнями растений, перемещение подвижных азотсодержащих субстанций из одного слоя почвы в другой (Лямкина, Хворова, 2011).

Углеродные модели, в основном, оценивают потоки CH_4 и CO_2 , как, например, модель их эмиссии из многолетнемерзлых болот криолитозоны России, связанных с разложением сезонноталого органического вещества при повышении температуры грунта (Анисимов и др., 2005), модель круговорота вещества в мезотрофном болоте (Logofet, Alexandrov, 1983), модель оценки дыхания почвы на пастбищах (Hunt, 1977), T&P (Temperature and precipitations, Температура и осадки) для CO_2 (Raich, Potter, 1995) и MEM (Methane emission model, Модель эмиссии метана) для CH_4 (Cao et al., 1995), модель временной динамики CO_2 и биоты на основе метода главных компонент (Антоновский и др., 1999), модель зависимости направления потока углерода от температуры воздуха, влажности почвы и фотосинтетически активной радиации в тундровых экосистемах (Карелин и др., 2013). Модель RothC (Rothamsted, Ротамстед) (Coleman et al., 1997) широко используется для оценки потоков C в почве, эмиссии CO_2 и динамики C_{org} , в том числе для экстраполяции точечных данных на региональный уровень (Abbas, 2013; Smith et al., 2007; Романовская, 2008б).

Блоки C содержатся также в климатических моделях, оценивающих взаимосвязи между потеплением климата, концентрацией CO_2 в атмосфере и депонированием C в наземных экосистемах (Cox et al., 2001; Володин, 2007; Мохов и др., 2006). Параллельно созданы несколько моделей взаимосвязи почвы и растений – SiB (Simple Biosphere, Простая биосфера) (Sellers et al., 1986), Wageningen (Вагенинген) (Penning de Vries et al., 1989), RCSODS (Rice Cultivation Simulation Optimization-Decision Making System, Имитационная система

оптимизации и принятия решений при возделывании риса) (Gao et al., 1992), DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, Система поддержки принятия решений для изменения агротехнологии) (Tsuji et al., 1994).

Позже появились модели, учитывающие углерод-азотные взаимодействия, например, TEM (Terrestrial ecosystem model, Модель экосистемы суши) (Raich et al., 1991), CENTURY (Век) (Parton et al., 1993). Для лесных экосистем созданы индивидуально-ориентированная система моделей EFIMOD (Forest ecosystem model, Модель лесной экосистемы) (Шанин и др., 2010) и модель CNTEM (Carbon-nitrogen terrestrial ecosystem model, Углерод-азотная модель экосистемы суши), учитывающая также обратные связи между климатом и циклом С на суше (Sokolov et al., 2008), а также имитационная модель роста и круговорота элементов в системе «лес-почва» (Priputina et al., 2014). В начале XXI в. появились трехмерная экосистемная модель с гидродинамическим блоком (Anderson et al., 2007), модель O-CN оценивающая взаимодействия растительности, надпочвенного слоя детрита и органического вещества почвы (Zaehle, Friend, 2010), модели динамики органического вещества почвы с точки зрения его физического закрепления и гумификации (Чертов, Комаров, 2013), в том числе модели динамики органического вещества в почве ROMUL и ROMUL_HUM (Chertov et al., 2017).

В работе (Благодатский, 2011) речь идет о модели MiCNiT (Microbial Carbon and Nitrogen turnover, Микробный круговорот углерода и азота), входящей в состав модульной системы MoBiLE (Modular Biosphere simulation Environment, Модульная биосферная имитация окружающей среды), – биогеохимической модели круговорота микробного азота и углерода в почве, направленной на комплексное описание потоков вещества в наземных экосистемах, включая эмиссию CO₂ и других ПГ, молекулярного азота и его оксидов. Она была разработана на основе модели DNDC (DeNitrification-DeComposition, Денитрификация-Разложение) (Li, 2000), одной из ее разновидностей PnET-DNDC (Model of photosynthesis, evaporation and net primary production, Модель фотосинтеза, испарения и чистой первичной продукции) (Li et al., 2000), ECOSYS

(от ecosystem – экосистема) (Grant, Pattey, 2003), а также моделей микробного дыхания и денитрификации (Leffelaar, Wessel, 1988) и микробного разложения органического вещества (Schimel, Weintraub, 2003).

Глобальные биосферные модели. За последнее время глобальные модели ORCHIDEE (Орхидея), LPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land, Лунд-Потсдам-Йенская модель землепользования), ISAM (Integrated Science Assessment Model, Комплексная научная оценочная модель), UVicESCM (University of Victoria's Earth System Climate Model, Модель климатической системы Земли Университета Виктории), разработанные с целью анализа интенсивностей потоков в цикле углерода при различных сценариях антропогенных воздействий, были дополнены циклом азота (Xu, Prentice, 2008; Wania et al., 2012). Хотя для последнего создана индивидуальная модель его глобального биогеохимического цикла в экосистемах суши (Lin et al., 2000).

Среди первых моделей, сочетающих в себе круговороты нескольких элементов, следует отметить модель биогеохимических циклов углерода, азота и фосфора, позволяющую оценить воздействие ядохимикатов на их потоки на суше и в океане (Morgan, Weinberg, 1972); московскую биосферную модель (МБМ) – первую версию глобальной модели биосферы, включающую климатический, демографический, антропогенный и биосферный блоки, при этом последний сочетает модели глобальных круговоротов углерода, кислорода, азота и воды, модели океанической биоты и наземных экосистем (Крапивин и др., 1982).

Часто углерод-азотный блок включается в модели взаимодействия нескольких геосферных оболочек. Модель BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, Схема биосферно-атмосферного переноса) оценивает динамику С и N в биосфере, включая почву, и атмосфере (Dickinson et al., 1986); имитационная модель CYCLES (Циклы) анализирует антропогенное влияние на биогеохимические циклы углерода, азота, фосфора и серы в системе «атмосфера – наземные экосистемы – океан» (Elzen et al., 1995). Взаимодействие глобальных биохимических циклов азота и углерода достаточно полно представлено в глобальной модели «атмосфера–растения–почва» (Моисеев и др., 1985; Тарко,

2005), которая изначально возникла из модели системы «атмосфера–океан» (Новичихин, Тарко, 1986; Перванюк, 2001), а на современном этапе была дополнена антропогенными выбросами CO_2 при сжигании ископаемого органического топлива (Курбатова, Тарко, 2012). В работе (Кондратьев и др., 2003) описана глобальная имитационная модель, составными блоками которой являются модель наземной растительности, модель функционирования океанической экосистемы, модель глобального водного баланса, а также модели глобальных биогеохимических циклов углерода, азота, фосфора и серы.

Преимущества моделей. В большинстве современных биогеохимических моделей механизмы отклика эмиссии на изменения температуры и влажности представлены в виде простой эмпирической нелинейной функции (Davidson et al., 2006). Но в конце XX в. было обнаружено, что учет только лишь эмиссии CO_2 и ее связей с температурой не позволяет создать сбалансированный углеродный бюджет; соответственно, был сделан вывод о необходимости включать в интегрированные климатические модели углерод-азотный блок, учитывающий поступление азота, зависящее, прежде всего, от его антропогенных источников (Elzen et al., 1997).

Во многих работах было отмечено, что при совместном использовании в моделях углеродного и азотного циклов (по сравнению с данными моделей, учитывающих только углеродный цикл) результаты показывают практически полное ослабление обратных связей между климатом и углеродным циклом (Sokolov et al., 2008), уменьшение отклика наземного углеродного цикла на межгодовую изменчивость приповерхностной температуры и количества осадков (Thornton et al., 2007), снижение интенсивности поглощения CO_2 растительным покровом при возрастании его концентрации в атмосфере и отсутствии роста приповерхностной температуры (Gerber et al., 2010; Jain et al., 2009), снижение в 3,8 раза общего поглощения C растительностью, обусловленного возрастанием концентрации CO_2 в атмосфере для периода 2000–2100 гг., и сокращение стока C в наземные экосистемы на 53–78% (Thornton et al., 2009).

Подобное снижение интенсивности фотосинтеза, продуктивности

растительного покрова, а также скорости разложения надпочвенного детрита и органического вещества почвы при рассмотрении совместной динамики двух элементов связано с лимитирующим действием доступного для растений минерального азота и наблюдается чаще в регионах с недостатком его почве (Голубятников и др., 2013). Соответственно, углерод-азотные модели позволяют получить реалистичные оценки современных запасов и потоков этих элементов в растительности, детрите и органическом веществе почвы, а также определить их изменения при возможных климатических изменениях (Базилевич, Титлянова, 2008; Благодатский и др., 1992; Vitousek, Howarth, 1991).

Кроме учета углерод-азотных взаимодействий, современные модели позволяют решить и другие проблемы. Так, в работе (Тарко, 1992) представлена разработка единой модели глобального цикла углерода и азота в системе атмосфера – растения – почва – океан (АРПО), на примере которой рассчитано, что в случае антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу и загрязнения экосистем суши принцип Ле-Шателье (на котором основывается способность биосферы и ее подсистем ослаблять антропогенные воздействия) выполняется до определенного порога, после достижения которого эффект ПГ начинает усиливаться.

Серьезными факторами, сдерживающими развитие математического моделирования органического вещества почв, служат неоднородность методов определения и недостаточность экспериментальных данных для построения моделей. Возникает все более широкий круг задач для включения в существующие и новые динамические модели: оценка работоспособности существующих теоретических концепций, решение проблемы качества исходных данных, детализированный учет гидротермических условий трансформации органического вещества в почве, оценка его распределения по профилю почвы с учетом вертикальной и горизонтальной миграции, рассмотрение влияния минералогического состава почвы на динамику органического вещества и азота, включение биологических механизмов гумусообразования с количественным определением роли почвенной фауны (Чертов, Надпорожская, 2016).

На разных уровнях моделирования возникает каскад неопределенностей,

вызванных местными климатическими особенностями, прежде всего, различным количеством осадков (Ceglar, Kajfez-Bogataj, 2012) и изменением качества почв (Tazhibayeva, Townsend, 2012), решить которые позволяет применение ансамблевого подхода (Müller et al., 2010). При таком мультимодельном подходе общая модель представляется в виде совокупности локальных (Cantelaube, Terres, 2005) и вводятся переменные, характеризующие региональные особенности (Oettli et al., 2011). Подобный метод использования ансамбля прогнозов дает дополнительную информацию для оценки явления и, следовательно, преимущество для принятия управленческих решений. На основе оценки состояния экосистем и экосистемных услуг оформляются модели типа ПРАП (Почва - Растительность - Атмосфера - Перенос) или SVAT (Soil - Vegetation - Atmosphere - Transfer), предназначенные для формирования системы принятия экологически безопасных хозяйственных решений (Ольчев, 2015).

1.5. Выводы

1. Диоксид углерода, метан и закись азота выступают в качестве основных парниковых газов, являющихся ключевой причиной современных климатических изменений. Их эмиссия от секторов сельского хозяйства и землепользования в России в течение последних трех десятилетий постепенно уменьшается.

2. К одному из крупнейших пулов в биогеохимическом цикле углерода относится почвенное органическое вещество. На сегодняшний день нет единого мнения о содержании $C_{\text{орг}}$ в почвах мира, и в зависимости от состава и химической активности его разделяют на две-четыре фракции. В пахотных почвах под влиянием агроэкологических антропогенных факторов формируется специфический углеродный режим, характеризующийся потерей исходного $C_{\text{орг}}$ и формированием неустойчивого его баланса, снижением содержания микробной биомассы.

3. Дыхание почвы, или эмиссия CO_2 из почвы, состоит из дыхания корней и дыхания микроорганизмов, на долю которых соответственно приходится 1/3 и

2/3, и является одним из важнейших путей поступления CO_2 в атмосферу. Среди природных факторов наиболее существенное влияние на его интенсивность оказывают температура и влажность почвы.

4. Чистый экосистемный обмен характеризует баланс CO_2 в экосистеме, или обмен CO_2 между экосистемой и атмосферой, и рассчитывается как разность между фотосинтезом и дыханием экосистемы.

5. В последние три десятилетия в науках о Земле широко используется моделирование, в том числе для оценки динамики потоков биогенных элементов. В настоящее время разработаны как модели отдельных экосистем (леса, агроценозов, болот), так и биосферы в целом. За последние годы наибольшее распространение получили углерод-азотные модели, которые наиболее точно отражают влияние внешних условий на формирование углеродного бюджета, учитывая и динамику парниковых газов в атмосфере, и преобразования органического вещества в почве.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глава посвящена описанию имитационной модели DNDC, полевых опытов, по данным которых была проведена ее верификация, и Центрального Нечерноземья, на примере которого модель была использована для пространственно-временной оценки потоков CO₂ в агроландшафтах. Описаны методы сбора и подготовки входных данных для DNDC, способы анализа влияния внешних факторов на целевые показатели и оценки эффективности моделирования.

2.1. Модель DNDC

Описание модели. Для проведения исследования была выбрана модель DNDC (DeNitrification-DeComposition) – процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода и азота, в том числе биогенных парниковых газов, в почвах сельскохозяйственного назначения (Li et al., 1992a). Модель создавалась с целью интерпретации, интегрирования и прогноза многоплановых взаимосвязей между эмиссией парниковых газов в почве, факторами окружающей среды и экологическими драйверами. Она имеет простой интерфейс и находится в свободном доступе. Среди проблем применения этой модели: большое количество входной информации, высокие требования к качеству метеорологических данных и сведениям о содержании органического углерода в почве, множество допущений в движущих факторах эмиссии.

Современная версия DNDC представляет собой интеграцию алгоритмов, описывающих рост культур и почвенные биогеохимические циклы, а также циклы азота, углерода и воды в агроэкосистемах. Модель состоит из трех субмоделей: термо-гидрологической, блока азота (DeNitrification) и блока углерода (DeComposition). Все компоненты биогеохимических циклов рассчитываются с суточным интервалом. На рисунке 7 представлена

концептуальная схема модели, далее – ее углеродный блок, на который преимущественно ориентировалось настоящее исследование (рис. 8). Была использована версия DNDC 9.5 (User's guide, 2012).

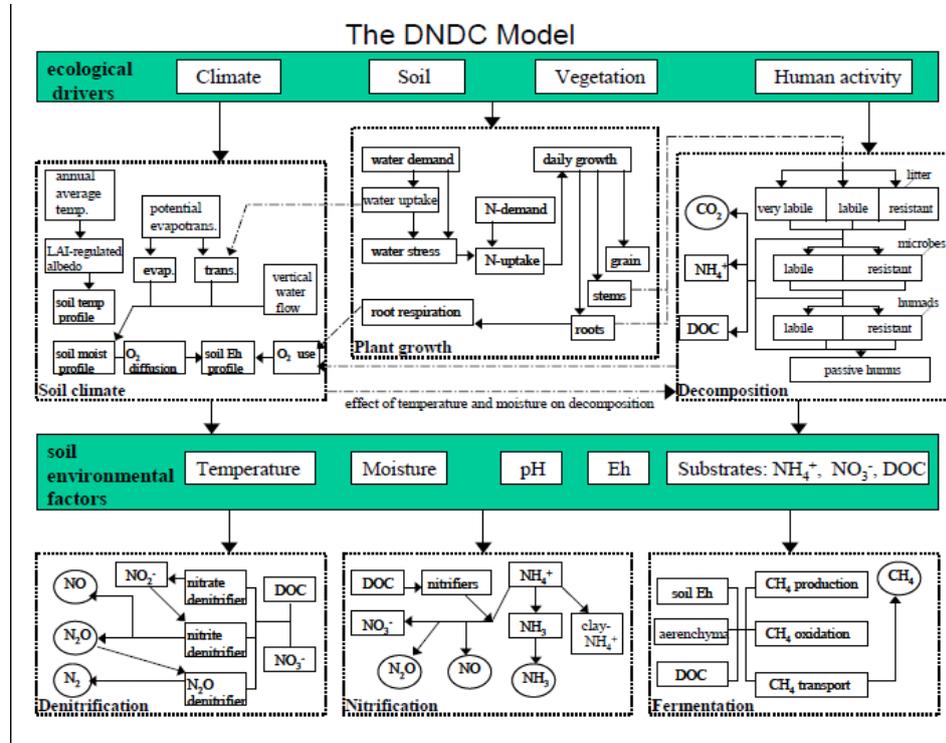


Рисунок 7. Структура модели DNDC (User's guide, 2012)

Входными параметрами модели являются:

- климатические (или погодные) условия: среднесуточные максимальные и минимальные температуры и количество осадков, солнечная радиация, концентрация CO₂ в атмосфере и содержание азота в осадках;
- характеристики почвенного покрова: содержание физической глины, плотность, рН, полевая влагемкость, а также содержание углерода в слое 0-10 см и деление его на фракции;
- особенности ведения сельскохозяйственной деятельности: информация о возделываемых культурах, их урожайность, даты посева и уборки, даты и технологии почвообрабатывающих мероприятий, количество и даты внесения удобрений.

Входные блоки, исходные данные для которых задавались, и выходные

блоки, результаты которых анализировались в настоящем исследовании, представлены на рисунке 9.

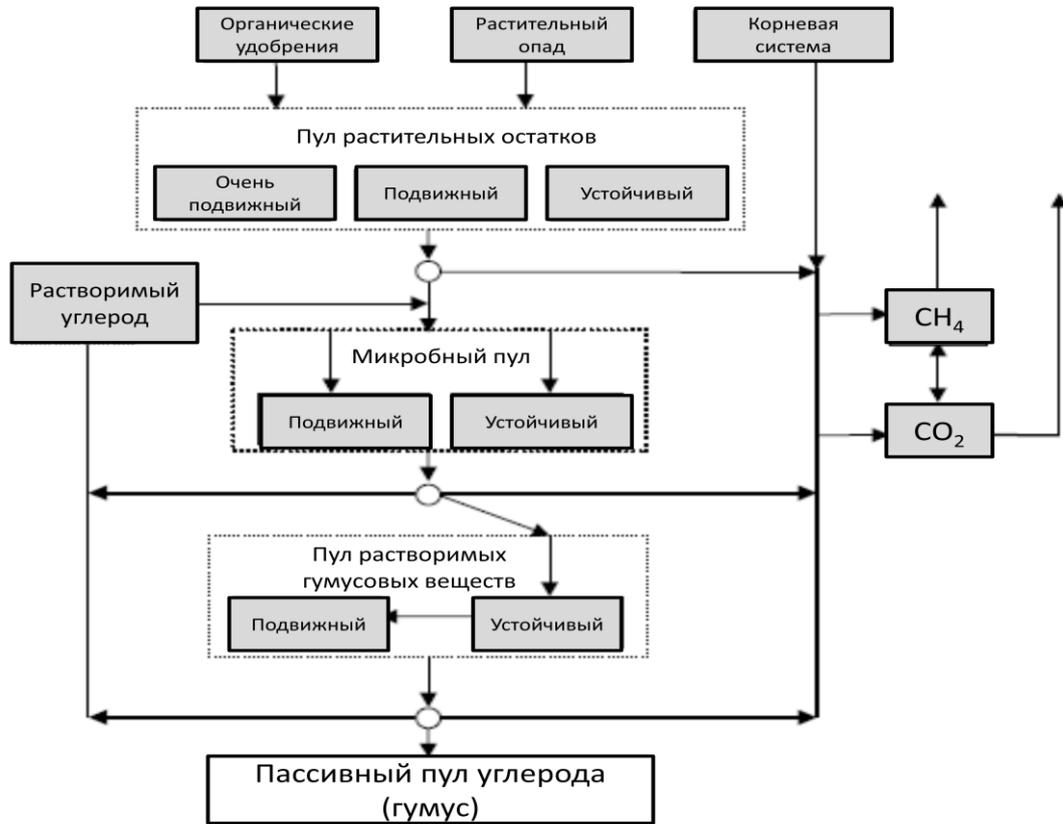


Рисунок 8. Схема строения углеродного блока модели DNDC (Zhang et al., 2002)

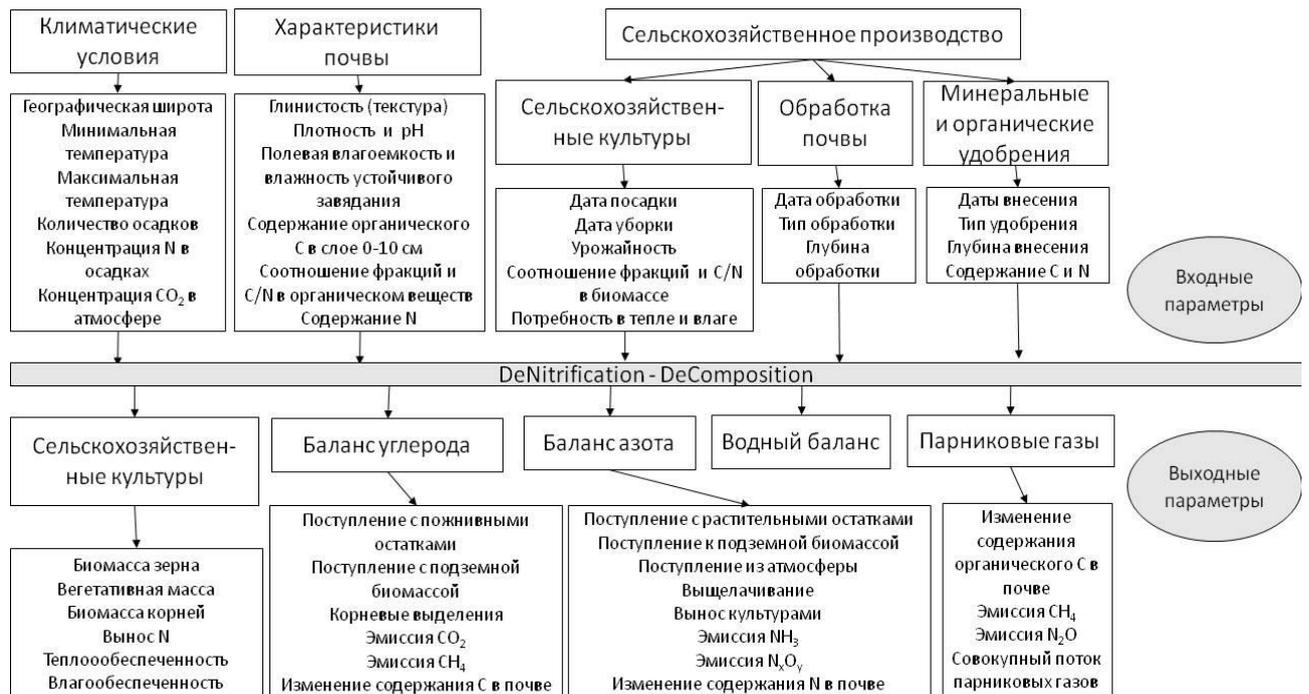


Рисунок 9. Схема модели DNDC, актуальная для настоящего исследования

Математическая база модели строится на основе уравнений Нернста и Михаэлиса-Ментен, описывающих термодинамические и кинетические особенности окислительно-восстановительных реакций, с учетом того, что в большинстве почв образование и поглощение трех важнейших парниковых газов регулируется взаимодействием между источниками углерода и акцепторами электронов. Эти уравнения представляют собой функции от ряда параметров окружающей среды – температуры, влажности, рН, испарения – которые зависят от нескольких групп экологических факторов, таких как климат, особенности почвы, растений и антропогенной деятельности (Li, 2007a).

Ниже представлены ключевые формулы, описывающие основные потоки CO_2 в экосистеме – дыхание растений (6-7) и микробное разложение органического вещества (8-12):

- Дыхание, поддерживающее жизнедеятельность:

$$R_{mk} = R_{m0k} Q_{10}^{\frac{(T_{cm}-25)}{10}} VM_k, \quad (6)$$

где R_{mk} – поддерживающее дыхание, г/м^2 ; R_{m0k} – коэффициент поддерживающего дыхания органа растения; Q_{10} – коэффициент ($= 2,0$); T_{cm} – среднесуточная температура; VM_k – биомасса органа растения, г/м^2 .

- Дыхание, поддерживающее рост:

$$R_g = (P_0 - \sum_{k=1}^4 R_{mk}) \left(1 - \frac{1}{R_{g0}}\right), \quad (7)$$

где R_g – дыхание на рост культуры, г/м^2 ; R_{g0} – коэффициент эффективности среднего роста; P_0 – суточный валовой фотосинтез, г/м^2 .

- Скорость разложения углеродного пула:

$$\Delta C_t = \mu_{clay} \mu_{CN} \mu_T \mu_W \mu_{til} K_{Ct} C_t, \quad (8)$$

где ΔC_t – суточная скорость разложения органического вещества в слое почвы, кг С/га ; μ_{clay} – коэффициент поглощения глиной; μ_{CN} – коэффициент соотношения С:N; μ_T – коэффициент температуры; μ_W – коэффициент влажности почвы; μ_{til} – коэффициент обработки почвы; K_{Ct} – скорость разложения пула углерода, день^{-1} ; C_t – пул углерода, кг С/га .

- Влияние температуры почвы:

$$\mu_T = 0.2161 + 0.093T_s - 0.0014T_s^2, \quad (9)$$

где T_s – среднесуточная температура в слое почвы, °C.

- Влияние влажности почвы:

$$\mu_W = -1.7827W_{fps}^2 + 2.3824W_{fps} - 0.222, \quad (10)$$

где W_{fps} – влажность слоя почвы, доля пор, заполненных водой, %.

- Влияние поглощения глиной:

$$\mu_{clay} = \log\left(\frac{0.14}{clay_l}\right) + 1, \quad (11)$$

где $Clay_l$ – доля глинистой фракции.

- Образование CO_2 в результате денитрификации:

$$CO_{2,DN} = \left(\frac{U_{DN}}{Y_c} + M_c\right)B(t) - \left(\frac{\delta B}{\delta t}\right)_g, \quad (12)$$

где $CO_{2,DN}$ – образование CO_2 в результате денитрификации; U_{DN} – относительная скорость роста денитрификаторов; Y_c – максимальное накопление растворимого углерода, кг С/кг С; M_c – углеродный коэффициент; $B(t)$ – общая денитрифицируемая биомасса, кг С/га; $\Delta B/\Delta t$ – потенциальное увеличение денитрифицируемой биомассы, кг С/га/ч.

Разновидности модели. Помимо классической DNDC, предназначенной для анализа эмиссии парниковых газов из сельскохозяйственных почв, создано целое семейство моделей на ее основе, учитывающих особенности землепользования в разных регионах (рис. 10).

Модель Crop-DNDC, учитывающая особенности роста сельскохозяйственных культур, сначала использовалась отдельно, а затем была интегрирована в исходную версию DNDC (Zhang et al., 2002). В ней рост растений моделируется не только с помощью физиологических процессов (фенологии, площади листовой поверхности, фотосинтеза, дыхания, распределения ассимилятов, роста корней и поглощения N), но и одновременно рассчитывается водный и азотный стрессы, которые тесно связаны с почвенными биохимическими процессами и динамикой влаги, а также количество растительных остатков, поступающих в почву в конце каждого вегетационного периода. Таким образом, в модели соединяются алгоритмы роста растений с

биогеохимическими компонентами почвы, что позволяет дать полную оценку углеродного, азотного и водного циклов в агроэкосистемах.

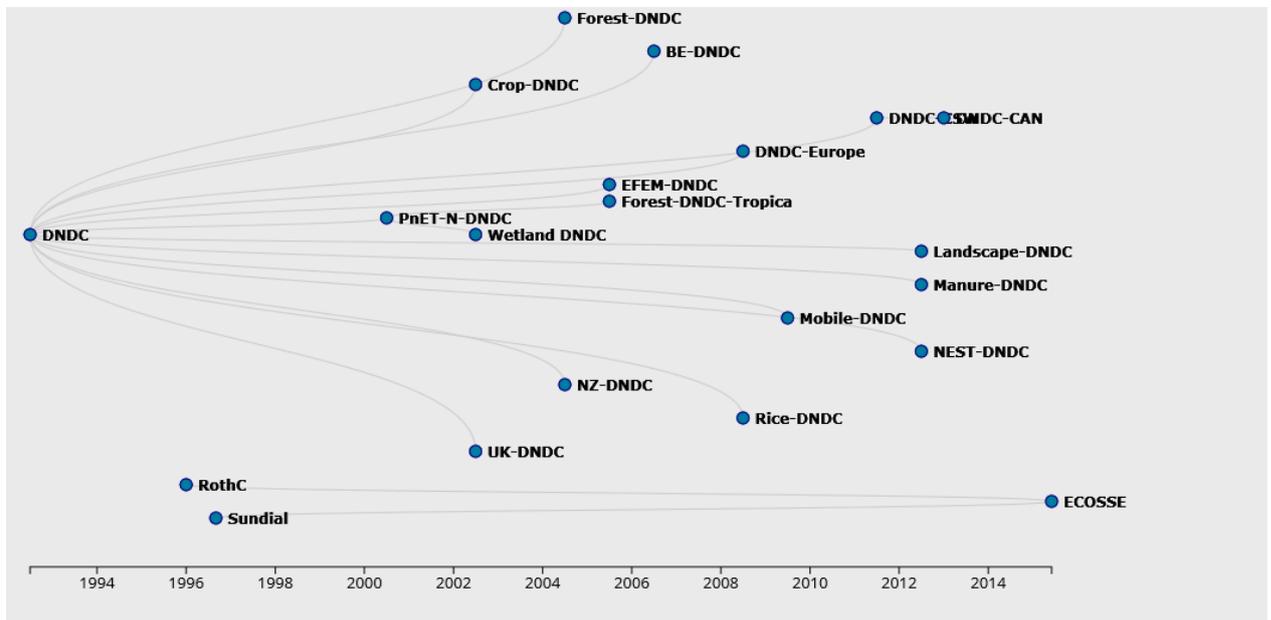


Рисунок 10. Семейство моделей DNDC (Global Research Alliance Modeling Platform (GRAMP))

Модель Wetland-DNDC сориентирована на определение динамики C и эмиссии парниковых газов во влажных лесных почвах и болотах (Li et al., 2004). Она была использована, например, для оценки баланса углерода и гидрологических условий во влажных лесах Миннесоты и Флориды, США (Cui et al., 2004, 2005).

Модель PnET-N-DNDC («фотосинтез – эвапотранспирация – азот») позволяет оценить газовый след N. Она была использована для анализа эмиссии N₂O из сельскохозяйственных почв на территории Европы (Kesik et al., 2005) и его депонирования во влажных тропических лесах Австралии и Коста-Рики (Kiese et al., 2005).

Модель Forest-DNDC создана для лесных экосистем и широко применяется в России, например, для оценки влияния уровня грунтовых вод на образование парниковых газов (Kurbatova et al., 2008), в частности для верховых болот Тверской области (Курбанова и др., 2009).

Специфическая модель для пастбищ Новой Зеландии NZ-DNDC (Saggar et al., 2004, 2007) ориентирована, прежде всего, на расчет эмиссии N_2O при различной интенсивности выпаса.

Экономико-экосистемная модель EFEM–DNDC была соединена с ГИС-технологиями и использована для сравнения эмиссии парниковых газов от растениеводства и животноводства на юго-западе Германии (Neufeldt et al., 2006).

Использование модели. Модель DNDC была использована на широком диапазоне почвенных и климатических условий для оценки компонентов биогеохимических циклов N и C в системе «атмосфера – растение – почва».

Первичная оценка эмиссии N_2O и CO_2 в широком диапазоне почв показала, что модель DNDC будет полезна при изучении связей между климатом и землепользованием, взаимодействия между почвой и атмосферой, направления потоков газов (Li et al., 1992b). Модель была использована для оценки эмиссии N_2O на пастбищах северного Китая (Wang, Wang, 2003), на лугах Ирландии (Hsieh et al., 2005). В статье (Li et al., 2005a) на основе DNDC изучалась связь биогеохимических циклов N и C в зависимости от интенсивности агротехнических мероприятий. В работе (Babu et al., 2005) DNDC использовалась наряду с полевыми измерениями для оценки эмиссии CH_4 с рисовых полей в Индии. В статье (Farahbakhshazad et al., 2008) рассматривается применение модели DNDC для анализа влияния альтернативных приемов земледелия (отсутствие вспашки, посев покровных культур, изменение количества и сроков внесения удобрения) на агроэкосистемы на среднем западе США с точки зрения урожайности, секвестрации C_{org} в почве, потери нитратного N из-за выщелачивания и эмиссии N_2O . В работе (Li, 2008) модель была применена для оценки потенциала депонирования атмосферного углерода почвой на примере севооборота из кукурузы и озимой пшеницы. В статье (Wang et al., 2008) на примере Китая изучена географическая изменчивость скорости потери и накопление углерода и содержания C_{org} в почве. В работе (Qiu et al., 2009) модель использована для оценки взаимосвязи секвестрации C и эмиссии N_2O и CH_4 в агроценозах Китая при использовании различных видов удобрений и

альтернативных приемов земледелия. Автор модели DNDC даже предлагает использовать ее в качестве составного элемента для расчета циклов элементов, от которых зависит распространение болезней (Li, 2007b).

В работе (Бучкина и др., 2007) проводилась адаптация модели DNDC к климатическим условиям северо-запада России на основе полученных результатов полевых измерений прямых эмиссий N_2O из супесчаных дерново-подзолистых почв при выращивании ярового ячменя, картофеля и белокочанной капусты с внесением азотсодержащих удобрений. Сравнение опытных и модельных данных показало, что DNDC может быть применена для прогноза сезонной динамики N_2O на супесчаных подзолистых почвах анализируемой сельскохозяйственной территории (Balashov et al., 2010). Но несмотря на то, что модель отражает влияние разных доз азотных удобрений на кумулятивные потоки N_2O , она несколько переоценивает их по сравнению с измеренными (Балашов и др., 2010).

При моделировании эвапотранспирации и эффективности водопотребления на полях яровой пшеницы и кукурузы в Канаде было отмечено, что DNDC дает более точный результат по сравнению с показателями, рассчитанными на основании уравнения Торнтвейта (Dutta et al., 2016). По оценке (Beheydt et al., 2007), выходные данные рассматриваемой имитационной модели значительно лучше прогнозировали эмиссию N_2O , чем регрессионные зависимости, и хорошо согласовывались с результатами полевых измерений на пахотных почвах. DNDC по сравнению с DayCent и STICS давала более качественные результаты для минерального N на участках яровой пшеницы на востоке Канады (Guest et al., 2017). В условиях северо-запада России было определено, что DNDC проигрывала модели SWAP (soil, water, atmosphere, plant) в точности прогноза сезонной динамики температур почвы, но лучше предсказывала содержание почвенной влаги, учитывая при этом изменения суточного количества осадков (Balashov et al., 2014).

2.2. Территория исследования

Апробация и оценка эффективности моделирования потоков CO_2 с помощью DNDC проводилась на основе сравнения с данными полевых измерений. Опыты, использованные для верификации модели, представлены на рисунке 11.



Рисунок 11. Географическое расположение полевых опытов, по данным которых проводилась верификация модели DNDC

Опыт КБС ИГ РАН. Курская биосферная станция Института географии РАН (КБС) расположена в селе Панино, Медвенского района, Курской области. Координаты КБС $51^{\circ}54'$ с.ш., $36^{\circ}10'$ в.д.

КБС – лесостепной географический стационар, лежащий в 20 км к югу от Курска вблизи Центрально-Черноземного биосферного заповедника. Станция была основана и оборудована как общегеографическая в 1958-1961 гг. в качестве дополнительного элемента к экспедиционным исследованиям в Центрально-Черноземном районе, что позволяет проследить и оценить влияние различных видов сельскохозяйственной деятельности на геосистемы лесостепной зоны за длительный период времени (Грин, 1984; Природно-антропогенные геосистемы, 1989; Петрова, 2008).

Опытные поля КБС расположены на тяжелосуглинистых выщелоченных черноземах (Haplic Chernozem), характеристики которых были взяты из монографии (Люри и др., 2010):

- содержание гумуса в пахотном горизонте 5,5%, т.е. находится на минимальном уровне для этого типа почв,
- лабильные фракции составляют 25-35% общего органического вещества, доля прочно связанного с глинистыми комплексами C – 40-50%,
- плотность почвы повышена до 1,2-1,3 г/см³ в связи с дегумификацией, увеличением глыбистости и снижением пористости в результате сельскохозяйственного использования (табл. 7).

Измерения дыхания пахотных почв проводились в течение вегетационного сезона (с апреля по октябрь) 2017 г. камерным методом с помощью портативных инфракрасных газоанализаторов AZ 7752 (AZ instruments, Taiwan) и LI-8100A (Li-Cor, Nebraska, USA) (LI-COR, 2012) со средней периодичностью 1 раз в 10-15 дней и одновременной оценкой температуры воздуха, температуры почвы и влажности почвы.

Данные измерений были предоставлены д.б.н., профессором Д.В. Карелиным (МГУ им. М.В. Ломоносова, ИГ РАН).

Суточные температуры воздуха и количество осадков были взяты из базы данных ВНИИ ГМИ – МЦД по метеостанции г. Курск.

Таблица 7. Характеристика почвы Курской биосферной станции (по материалам Люри и др., 2010)

Горизонт	Глубина, см	Окраска	Гранулометрический состав	Структура	Переход к нижележащему горизонту	pH _{вод}	pH _{сол}	C _{орг} , %	Гумус, %	CO ₂ карб., %	Объемный вес, г/см ³
PUw	0-5	Темно-серый	Тяжелый суглинок	Бесструктурный с единичными зернами и комками, рыхлый, много корней	Граница ровная	6,8	5,8	3,23	5,6	0	1,06
PU ₁	5-29	Темно-серый, чередование черных и темно-серых участков	Тяжелый суглинок	Мелкоглыбистый, меньше комков и почти нет зерен, мертвые корневые остатки, много живых корней	Переход ясный, граница ровная	6,7	5,5	3,16	5,5	0	1,24
AU ₁	29-55	Темно-серый, небольшие зоогенные желто-бурые пятна (перерыв фауной)	Тяжелый суглинок	Комковато-мелкоглыбистый, заметно уплотнен, корней значительно меньше	Переход постепенный, граница ровная	6,5	5,1	2,56	4,4	0	1,03
AU ₂	55-80	Буровато-темно-серый	Тяжелый суглинок	Мелкоглыбысто-комковатый, менее уплотнен, корни единичны	Граница неровная	6,8	5,2	1,81	3,12	0	---
B/AU	80-120	Неравномерно окрашен, темно-серые и желто-бурые участки (сильно перерыв)	Тяжелый суглинок	Комковато-глыбистый, более уплотнен, не кипит от HCl	Переход ясный, граница неровная	6,9	5,3	1,06	1,83	0,08	---
Cca	120-150	Желто-бурый	Тяжелый суглинок	Мелкоглыбистый с отдельными призмами, уплотнен, много карбонатного мицелия		8,7	7,4	---	---	3,43	---

На опытных участках возделывались озимая пшеница, яровой ячмень, картофель и подсолнечник. Для подготовки входных данных для модели на базе перечня рекомендуемых мероприятий с учетом реальных дат проведения обработок почвы были составлены технологии возделывания культур; количество углерода в биомассе определялось на основании данных официальной статистики по урожайности и содержанию С (табл. 8).

Таблица 8. Характеристика культур, возделываемых на КБС

Культура	Технология возделывания	Урожайность основной продукции, ц/га		Содержание С в биомассе, %		Количество С биомассы, кг/га
		Значение	Ссылка	Значение	Ссылка	
Озимая пшеница	Типовые технологические карты, 1984; Зинченко и др., 2012	53,3	ЕМИСС, Росстат	48,53	Распоряжение Минприроды, 2017	2586,7
Ячмень	Гаврилович, 2007; Черкасов и др., 2008	43,7		45,67		1995,8
Картофель	Евстропов, 2011	164,2		42,26		6854,6
Подсолнечник	Пимахин, 1991	22,9		45,00		1030,5

Опыт ИФХиБПП РАН. На Полевой опытной станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН) в г. Пущино Серпуховского района Московской области заложен неудобряемый зернопаровой севооборот.

Географические координаты Опыта 54°49'с.ш., 37°34'в.д. Он расположен на склоне северной экспозиции крутизной 1-3°. Грунтовые воды залегают глубже 200 см. Территория относится к зоне смешанных и широколиственных лесов, естественный растительный покров представлен полынью и пижмой.

Почва участка агросерая лесная (Luvic Phaeozems) обычная окультуренная среднесуглинистая на покровном суглинке (табл. 9). Ее гранулометрический состав, определенный в ИФХиБПП РАН, представлен в таблице 10. Соответственно, на основании треугольника Ферре (рис. 15) при вводе данных в модель эта почва идентифицировалась как silty clay loam, или глинисто-илистый (пылевато-иловатый) суглинок (Руководство, 2012).

При имитационном моделировании учитывались особенности верхнего слоя почвы 0-10 см (табл. 11). Характеристики пулов органического вещества исследуемой почвы были взяты из работы (Ларионова и др., 2011), согласно которой доля легкорастворимого органического вещества (humads) составляет 0,335, труднорастворимого (humus) – 0,655. Еще 0,01 фиксируется в модели как растительный детрит. Остальные характеристики серых лесных почв были уточнены по данным Единого госреестра почвенных ресурсов России (2014).

Культуры в севообороте чередовались следующим образом:

- 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009 – озимая пшеница,
- 2002, 2004, 2007 – чистый пар.

Технология возделывания отличалась малой интенсивностью. Удобрения в Опыте не вносились. Сроки проведения почвообрабатывающих мероприятий на территории Опыта были рассчитаны на основании рекомендаций для Нечерноземной зоны (Грачев, 1980, Останина и др., 2008).

Значение биомассы зерна озимой пшеницы определялось расчетным путем на основе средней урожайности культуры по Московской области (ЕМИСС, Росстат) и содержания углерода в ней 48,53% на сухое вещество (Распоряжение Минприроды, 2017) и было принято равным 1346 кг С/га.

Таблица 9. Характеристика почвенного профиля на территории Пущинской опытной станции
(по информации И.Н. Кургановой)

Слой	Глубина, см	Название	Цвет	Плотность	Гранулометрический состав	Структура	Включения	Переход к нижележащему слою
A _{пах}	0-25 (25)	Пахотный	Серовато-коричневый	Уплотненный	Легкий суглинок ближе к среднему	Комковато-порошистая	Перепаханные стебли полыни и прочие пожнивнокорневые остатки, корни травянистых; ходы червей	в A ₁ четкий, ровный по цвету и плотности
A ₁	25 – 44 (19)	Гумусово-аккумулятивный	Темно-серый с коричневатым оттенком	Плотный (в верхней части переуплотненный)	Легкий суглинок ближе к среднему	Комковато-зернистая	Корни трав, ходы и копролиты червей; обильная кремнеземистая присыпка на гранях структурных отдельных	в A ₂ B плавный, затеками, по цвету и структуре
A ₂ B	44 – 85 (41)	Переходный оподзоленный	Коричневатобурый	Плотный	Средний суглинок	Средне-мелкокоореховатая	Корни трав, ходы червей; обильная кремнеземистая присыпка на гранях структурных отдельных, гумусовые кутаны	в B ₁ плавный по цвету и плотности
B ₁	85 – 110 (25)	Иллювиальный (подгоризонт 1)	Бурый с рыжеватым оттенком	Плотный	Средний суглинок	Ореховато-столбчатая	Редкие корни многолетних трав, глинистые кутаны, единичные ходы червей	в B ₂ плавный, по структуре и липкости
B ₂	110 – 132 (22)	Иллювиальный (подгоризонт 2)	Бурый с рыжеватым оттенком	Плотный, слабо липкий	Средний суглинок ближе к тяжелому	Глыбистая	Глинистые кутаны, охристые пятна	в BC плавный, затеками, по плотности, цвету и липкости
BC	132 – 150 (18)	Переходный к почвообразующей породе	Светло-бурый	Липкий; очень плотный	Тяжелый суглинок	Комковато-глыбистая	Частые охристые пятна	--

Таблица 10. Гранулометрический состав почвы в Опыте ИФХиБПП РАН, %

Классификация Качинского		Зарубежная классификация		
Глина ($< 0,01$ мм)	Песок ($> 0,01$ мм)	Глина ($< 0,002$ мм)	Пыль /ил ($0,002-0,05$ мм)	Песок ($> 0,05$ мм)
41,84	58,16	31,84	52,52	15,64

Таблица 11. Некоторые характеристики агросерой лесной почвы в Опыте ИФХиБПП РАН (слой 0-10 см)

Параметры	Значения	Источник
Объемная масса	1,06 г/см ³	Данные измерений в Опыте ИФХиБПП РАН
Полная полевая влагоемкость	46,6%	
pH _{KCl}	5,25	
C _{орг}	12,7 г/кг почвы	
Легкоминерализуемый гумус	33,5 % от C _{орг}	Ларионова и др., 2011
Трудноминерализуемый гумус	65,5 % от C _{орг}	
Пористость	50%	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014
Полевая влагоемкость	49%	
Соотношение C:N	12	

Интенсивность эмиссии CO₂ из почвы определяется методом закрытых камер (Lundegardh, 1924), в его современной модификации (Макаров, 1977; Ларионова и др., 1993). Измерения проводились непрерывно, круглогодично, с ноября 1997 по октябрь 2009 гг. с периодичностью один раз в 7-10 дней в 3-5 кратной повторности. Анализ газовых проб проводился в день отбора с использованием газовых хроматографов («Chrom-5», ЧССР или «Кристалл-2000», Россия) (Лопес де Гереню и др., 2001). Параллельно с определением дыхания почв измерялись температура и влажность почвы.

Данные измерений были предоставлены д.б.н., профессором И.Н. Кургановой (ИФХиБПП РАН).

Данные о температуре воздуха и количестве осадков за весь период наблюдений были предоставлены Станцией фонового мониторинга, расположенной на территории Государственного Приокско-Террасного Биосферного Заповедника (Данки, Московская область).

Опыт СамГУ. Для верификации динамики чистого экосистемного обмена был взят эксперимент, расположенный в Узбекистане, поскольку в России измерения такого рода не выполнялись. Опытный участок полупустынного пастбища расположен в учебном хозяйстве «Раззак Джахонгиров» Самаркандского государственного университета (СамГУ) близ г. Карнаб (Qarnob) в Пахтачийском районе Самаркандской области в западной части Узбекистана.

Географические координаты точки 39°40' с.ш. 65°46' в.д., высота над уровнем моря 460 м, рельеф равнинный. Климат территории континентальный, и, согласно классификации Кеппена, местность относится к холодным аридным пустыням. Среднегодовая температура составляет 17,0°C, максимальные температуры наблюдаются в июле, минимальные – в январе. Годовая сумма осадков 182,6 мм, наиболее увлажнены зимние месяцы с ноября по март, тогда как в июне-августе нередки засушливые явления.

Почвенный покров участка представлен тяжелосуглинистыми гипсоносными серо-бурыми почвами (Calcic Gypsisols), сводная характеристика которых представлена в таблице 12. Растительный покров состоит преимущественно из полыни раскидистой (*Artemisia diffusa*) и эфемеров. По данным (Янов, 2009), урожайность сухой массы полыни составляет 2 ц/га, при содержании безазотистых веществ 41,7%.

В рамках исследования в 1998-2001 гг. с марта по декабрь практически ежедневно измерялись температура и влажность воздуха, температура и влажность почвы, солнечная и фотосинтетически активная радиация, теплообмен и поток тепла от почвы, количество осадков и эвапотранспирация, а также нетто-поток CO₂, или чистый экосистемный обмен.

Использовалась мини-метеорологическая установка Bowen Ratio Energy Balance System (Model 023/CO₂ Bowen ratio system, Campbell Scientific Inc. (CSI),

Logan, UT, USA), закрепленная на треноге с вращающимися плечами. Образцы воздуха отбирались с высот 1,0 м и 2,0 над уровнем почвы каждую секунду (McGinn, King, 1990). Среднесуточные значения концентрации CO₂ и всех метеорологических параметров рассчитывались с помощью программного обеспечения SPLIT, предоставляемого вместе с установкой.

Таблица 12. Некоторые характеристики серо-бурых почв

Показатель	Значение	Ссылка
Плотность	1,22-1,27 г/см ³	Бабаев, Рамазанова, 2017
pH	8,5-9,5	Белобров и др., 2004
Гумус	0,7-1,0%	
Полевая влагоемкость	18,7% (15-22%)	Мамедов, 2015
Влажность устойчивого завядания	10,2% (7,4-12,8%)	
Водопроницаемость	18 мм/ч	
Пористость	50%	
Содержание азота	9,4-16,3 мг N/кг почвы, содержание аммиачного азота в три раза выше, чем нитратной формы	
Содержание глины	44,2%	

Температура воздуха измерялась термистором. Давление водяного пара рассчитывалась по соотношению показателей гигрометра и температуры. Интенсивность солнечной радиации измерялась радиометром на высоте 2 м. Поток тепла от почвы оценивался с помощью платы на глубине 0,06 м. Температура почвы измерялась двумя термопарами на глубинах 0,02 и 0,04 м. Для измерения атмосферного давления использовался силиконовый сенсор. Сверху был установлен трехчашечный анемометр для определения скорости ветра и осадкомер. Концентрация CO₂ и паров воды измерялась портативным

инфракрасным газоанализатором (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) на высотах 1,0 и 2,0 м и переводилась из ppm в $\text{г м}^{-2} \text{ч}^{-1}$.

Чистый экосистемный обмен CO_2 между экосистемой и атмосферой, или нетто-баланс CO_2 , измеряемый с помощью приборов, расположенных на определенной высоте над растениями, определялся по значению разности измерений на двух уровнях (Held et al., 1990). Если потоки от атмосферы к растительности отрицательны, т.е. направлены вниз, экосистема функционирует как сток CO_2 , и, соответственно, процесс ассимиляции доминирует над деструкцией, если же потоки к атмосфере положительны, т.е. направлены вверх, экосистема функционирует как источник CO_2 для атмосферы (O'Dell et al., 2014).

Метод Боуэна, использованный в этой части исследования, относится к микрометеорологическим методам измерения потока CO_2 (Follett et al., 2011), и в противоположность камерному методу учитывает процессы взаимодействия в слое почва – атмосфера на более обширной территории (Dugas, 1993). Согласно этому методу, направление потока CO_2 определяется по соотношению потоков явного и скрытого тепла Боуэна (Bowen, 1926), т.е. через разницу температур воздуха и давлений водяного пара на двух уровнях, или вертикальный концентрационный градиент (Bowen ratio, 2005).

В рамках рассматриваемого метода используются формулы для расчета потоков тепла от почвы H (13) и скрытого тепла L_e (14):

$$H = \rho C_p k_H \frac{\delta T}{\delta z}, \quad (13)$$

где ρ – плотность воздуха; C_p – специфическое тепло воздуха; k_H – коэффициент диффузии; T – температура; z – высота по вертикали.

$$L_e = \frac{\lambda \rho \varepsilon k_V}{P} \cdot \frac{\delta e}{\delta z}, \quad (14)$$

где λ – скрытая теплота испарения; ε – отношение молекулярного веса воды к молекулярному весу сухого воздуха; e – давление водяного пара; P – атмосферное давление.

Другими словами, отношение Боуэна (15) может быть представлено через отношение потоков явного и скрытого тепла:

$$\beta = \frac{H}{L_e} = \frac{PC_p}{\lambda \varepsilon} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{(e_1 - e_2)} \quad (15)$$

Поскольку первый множитель в правой части уравнения является психрометрической константой, отношение Боуэна фактически определяется через разницу температур и давлений водяного пара. Такой подход к оценке вертикального переноса от/к поверхности через градиент потока сходен с оценкой молекулярной диффузии и может быть определен как вертикальный концентрационный градиент (Bowen ratio, 2005).

При реализации метода коэффициенты турбулентного обмена для тепла, водяного пара и других газов считаются подобными, что в реальности бывает редко. К другим недостаткам метода относятся погрешности в измерении градиентов, также он неприменим утром, вечером и ночью из-за необходимости деления на ноль вследствие отсутствия градиента (Бурба и др., 2016).

Данные измерений были предоставлены д.б.н., профессором М.Г. Насыровым (СамГУ).

Информация о максимальных и минимальных суточных температурах воздуха и количестве осадков была взята из базы ВНИИ ГМИ – МЦД по метеостанции г. Самарканд.

Центральное Нечерноземье. Модельные эксперименты по оценке потоков CO₂ в пространстве и времени в агроландшафтах проводились для Центрального района Нечерноземной зоны, или Центрального Нечерноземья, как одного из ключевых общепринятых сельскохозяйственных районов России.

Нечерноземный регион – один из главных экономически значимых районов Европейской территории страны – получил свое название по преобладающему типу почв, в противоположность Черноземному региону. А Центральный его район в отличие от Северного, Северо-Западного и Волго-Вятского выделяется с точки зрения общности агроклиматических параметров и особенностей ведения сельскохозяйственного производства (рис. 12).

Согласно административно-территориальному делению, Центральное Нечерноземье включает в себя следующие субъекты России: Брянскую,

Владимирскую, Ивановскую, Калужскую, Костромскую, Московскую, Орловскую, Рязанскую, Смоленскую, Тверскую, Тульскую, Ярославскую области и город федерального значения Москву (рис. 13) (Общероссийский классификатор, 2000).

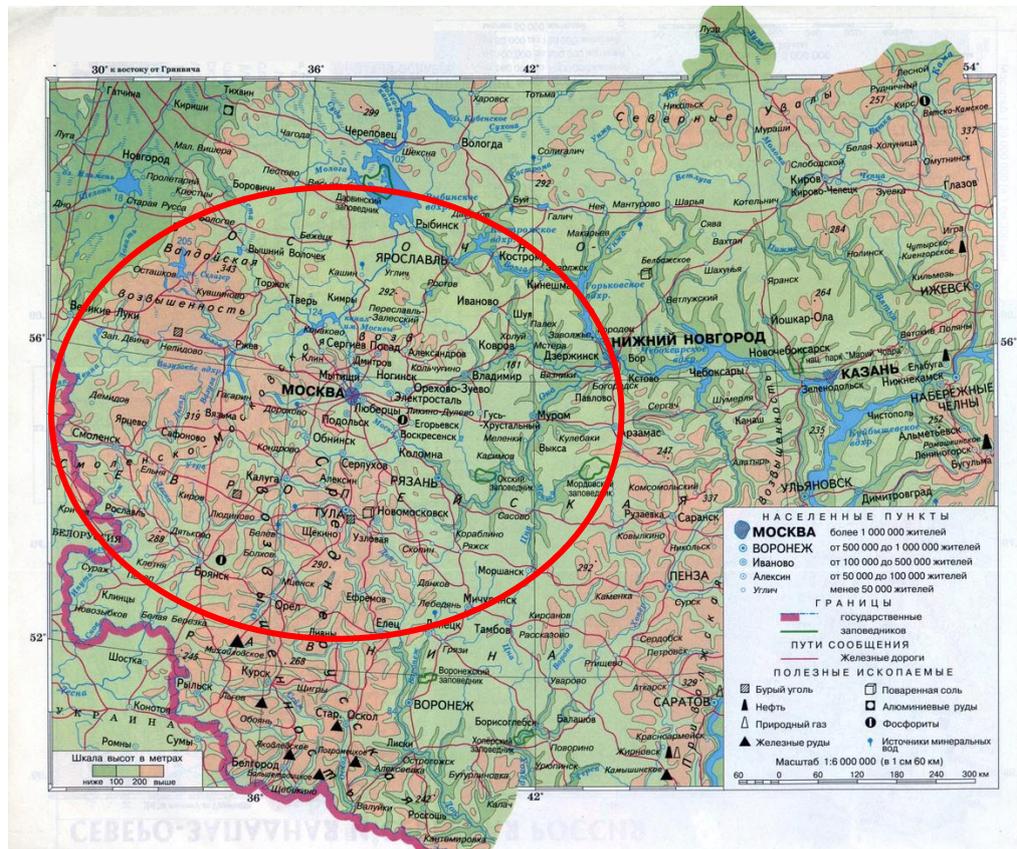


Рисунок 12. Центральное Нечерноземье на карте Центральной России

Рельеф Центрального Нечерноземья равнинный, высоты не превышают 300 м. Территория региона охватывает бассейны Верхней Волги, Оки, частично Днепра и Дона. Большая ее часть располагается в лесной зоне. Водные ресурсы оцениваются в 135 км^3 в год или 2% от общероссийских.

Сельскохозяйственные угодья занимают более $2/5$ всей площади Центрального района. Сельское хозяйство носит пригородный характер и специализируется на молочно-мясном животноводстве, свиноводстве, птицеводстве, выращивании картофеля и овощей. Пшеница возделывается на юге района – в Орловской, Тульской и Рязанской областях. Основные районы

концентрации посевов льна – Тверская, Смоленская, Ярославская, Московская области. Агропромышленный комплекс Центрального района дает примерно 50% всей сельскохозяйственной продукции Нечерноземной зоны России (Жариков, 2003). Тем не менее, для многих областей региона характерна низкая эффективность использования технических средств, определяющих уровень интенсификации сельскохозяйственного производства (Чумаков, 2003).



Рисунок 13. Области, входящие в Центральное Нечерноземье, на административной карте России

По классификации (Герасимова, 2007), Нечерноземный регион расположен в бореальных и суббореальных областях, граница которых проходит по параллелям $55-57^{\circ}$ с.ш. В бореальной таежной части Восточно-Европейской области расположен зональный ряд почв на суглинистых породах – глееподзолистых и подзолистых, среди которых широко развиты почвы избыточного увлажнения. В суббореальной лесной части почвенный покров относительно однообразен и складывается дерново-подзолистыми почвами, в том числе глееватыми и глеевыми. В южной части Нечерноземья, где находится лесостепная зона, преобладают серые лесные почвы.

Наиболее распространены на территории Центрального Нечерноземья дерново-подзолистые почвы, ограниченные с севера типичными подзолами, а с юга – бурыми лесными почвами; на Русской равнине широко представлены торфяные, торфяно-глеевые, полуболотные торфянисто-глеево-подзолистые почвы и глееземы (Геннадиев, Глазовская, 2005). Схема пространственного распределения почв в Центральном Нечерноземье представлена в таблице 13.

По классификации (Костин, Покровская, 1948), Центральное Нечерноземье лежит в средней полосе Европейской территории России и охватывает зону таежно-широколиственных лесов и лесостепь, по классификации (Борисов, 1953) – в зоне смешанных и лиственных лесов.

Климат зоны относительно единообразен, характеризуется значительной континентальностью, которая связана с центральным внутриматериковым положением района и возрастает с запада на восток. Отмечается также высокая зависимость формирующихся погодно-климатических условий от особенностей циркуляции атмосферы и, в частности, значительном влиянии на них атлантических воздушных масс (Переведенцев и др., 2012). Линия перехода от континентального климата к более влажному морскому лежит в направлении Брянск – Смоленск – Тверь. Отмечена тенденция к убыванию количества осадков, облачности, влажности почвы и воздуха с северо-запада на юго-восток, что связано с постепенным переходом атмосферной циркуляции с циклонического типа на северо-западе на антициклональный режим на юго-востоке (Костин, Покровская, 1948).

Для Центрального Нечерноземья характерна умеренно холодная зима (средняя температура января $-10...-11^{\circ}\text{C}$) и умеренно теплое лето (средняя температура июля $17...18^{\circ}\text{C}$) (Борисов, 1948). Температуры января убывают с юго-запада на северо-восток, температуры июля возрастают с севера на юг, при этом линейный тренд среднемесячной температуры воздуха в Центральном регионе имеет положительную направленность во все сезоны и составляет $0,84^{\circ}\text{C}/10$ лет (за 1975-2010 гг.), тогда как тренды сумм осадков по месяцам и сезонам разнонаправлены по знаку и отличаются большой пестротой

распределения, и отмечается тенденция к уменьшению количества осадков, оцениваемая в 12-14 мм/10 лет (Павлова, Сиротенко, 2012).

Таблица 13. Почвенный покров Центрального района Нечерноземной зоны
(Добровольский, Урусевская, 2004)

		Фация	Провинция	Распространение
Бореальный пояс				
Европейско-Западно-Сибирская таежно-лесная область	Подзона дерново-подзолистых почв южной тайги	Умеренных кратковременно промерзающих почв	Белорусская провинция дерново-подзолистых слабогумусированных и болотных низинных почв	Запад Брянской области
		Умеренных промерзающих почв	Прибалтийская провинция дерново-подзолистых слабогумусированных и болотно-подзолистых почв	Запад Тверской и Смоленской областей
			Среднерусская провинция дерново-подзолистых среднегумусированных почв	Ярославская, Костромская, Ивановская, Владимирская области, большая часть Московской, Смоленской областей, северные окраины Брянской, Рязанской областей, западная часть Калужской области
Суббореальный пояс				
Центральная лесостепная и степная область	Подзона серых лесных почв, оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов лесостепи	Умеренных промерзающих почв	Окско-Донская провинция оподзоленных, выщелоченных и типичных среднегумусных и тучных мощных и среднemocных черноземов и серых лесных почв	Частично Орловская, Тульская, Рязанская, Московская, Калужская области

По классификации (Сапожникова, 1977), основанной на суммах активных температур выше 10°C как основном показателе теплообеспеченности,

Центральное Нечерноземье охватывает прохладный подпояс среднеранних культур, ограниченный изотермами 1600-2200°C, занимающий территорию от Ярославской и Костромской областей на севере до Смоленской и Тульской областей на юге, и теплый подпояс среднеспелых культур, охватывающий территорию с суммами активных температур 2200-2400°C, где расположены Брянская, Орловская, Рязанская области.

2.3. Сбор и подготовка данных

Принципы работы. Были созданы базы данных характеристик климатических и почвенных условий, а также особенностей возделывания сельскохозяйственных культур на территории Центрального Нечерноземья, являющегося целевым регионом исследования. В качестве модельных объектов использовались области, для которых было найдено наибольшее количество требуемых справочных данных, необходимых для введения в модель.

Входные параметры были получены напрямую из литературных источников или путем нахождения средних значений на основе административно-территориального деления региона. Использовались три подхода к моделированию:

- Прямое – комплексное введение всех исходных данных в модель,
- Ступенчатое – прогрессивное введение данных, когда в каждый последующий цикл моделирования включались все предыдущие параметры и вводился один дополнительный элемент по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы,
- Осреднение результатов ступенчатого моделирования для получения значений, отражающих комбинацию всех видов сельскохозяйственной практики с учетом интенсивности технологий возделывания.

Климат. На основе информации ВНИИ ГМИ-МЦД нами была создана база данных климатических и агроклиматических ресурсов Центрального Нечерноземья. Из 20 станций, расположенных в этом регионе (рис. 14), в

настоящем исследовании использовались данные 16 (табл. 14) за период с 1990 по 2017 гг.

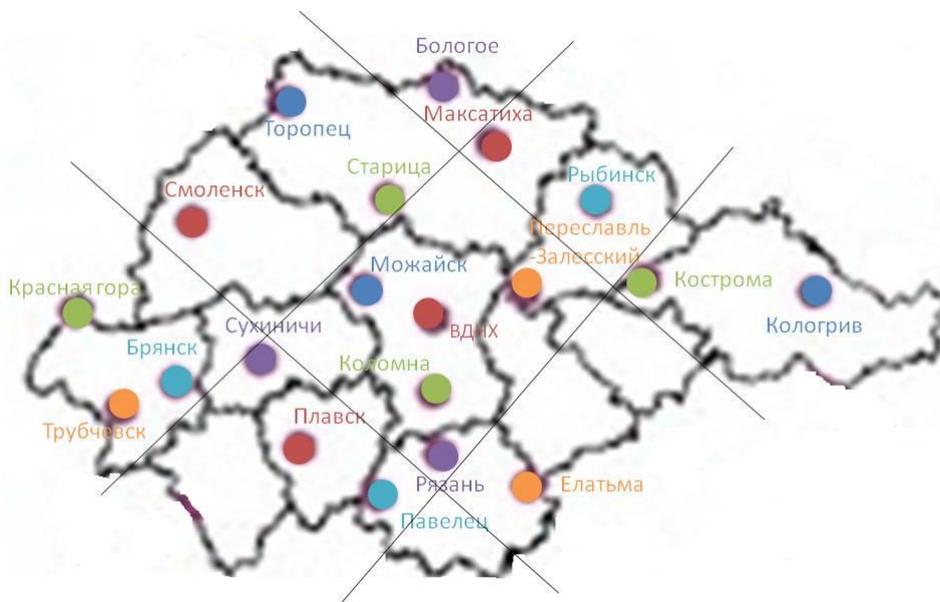


Рисунок 14. Расположение метеостанций на территории Центрального Нечерноземья

Средние за сутки максимальные и минимальные температуры воздуха и количество осадков рассчитывались по методике пространственного осреднения (Груза, Ранькова, 2012; Чернышева и др., 2014) для каждой области.

При верификации модели использовались метеоданные Московской и Брянской областей, оценка влияния внешних факторов на потоки CO_2 проводилась для условий Московской области, модельный эксперимент по восстановлению потоков CO_2 за 28 лет реализовывался на примере Калужской, Костромской, Московской, Смоленской, Тверской и Ярославской областей. Владимирская, Ивановская и Орловская области не входили в анализ, поскольку для них отсутствовали метеоданные в свободном доступе.

Еще одним важным показателем, который учитывается при моделировании, является концентрация N в осадках, которая на Европейской территории России

колеблется от 0,0024 до 0,0008 мг/дм³, в среднем составляя 0,0016 мг/дм³ (Вареник, 2009; Вареник и др., 2010), что эквивалентно 2,26 ppm. В Московской области с осадками в почву поступает 3,0-4,5 кг N/га (Иванов, 1969).

Таблица 14. Метеорологические станции, данные которых послужили материалами исследования

Область	Метеостанции	Индекс ВМО	Координаты	
			с.ш.	в.д.
Тверская	Бологое	26 298	57,90	34,05
	Торопец	26 479	56,48	31,63
	Старица	26 499	56,50	34,93
	Максатиха	27 208	57,80	35,90
Смоленская	Смоленск	26 781	54,75	32,07
Брянская	Брянск	26 898	53,25	34,32
	Красная гора	26 976	53,02	31,60
	Трубчевск	26 997	52,58	33,77
Костромская	Кологрив	27 164	58,82	44,32
	Кострома	27 333	57,77	40,85
Ярославская	Рыбинск	27 225	58,10	38,68
	Переславль-Залесский	27 425	56,70	38,80
Московская	Можайск	27 509	55,52	36,00
	ВДНХ	27 612	55,83	37,62
	Коломна	27 625	55,13	38,73
Калужская	Сухиничи	27 707	54,10	35,35

Почва. Основными характеристиками почвенного покрова, используемыми в модели, являются доля глинистой фракции (доля частиц <0,01 мм), рН и содержание органического углерода в верхнем слое (0-10 см). Эти параметры рассчитывались на основе Единого государственного реестра почвенных ресурсов

России (2014), при этом в анализ включались наиболее широко представленные типы почв, доля площади которых составляла не менее 30% площади региона. Соответствие между российскими и зарубежными названиями типов почв определялось с помощью методики ФАО (Multilingual soil database, 1995). Расчет входных параметров DNDC по характеристикам почв для областей Центрального Нечерноземья представлен в таблицах 15 и 16.

Таблица 15. Характеристика почв Центрального Нечерноземья (по материалам Единого государственного реестра, 2014)

Тип почвы	Область	Доля площади, %	Глубина верхнего слоя почвы, см	pH _{сол}	Гумус, %	Содержание глины, %
Дерново-подзолистые преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые	Калужская	33,4	21	5,8	1,4	12,9
	Ярославская	34,8				
	Московская	43,4				
	Смоленская	48,1				
	Тверская	48,4				
Дерново-подзолистые преимущественно мелко-подзолистые	Костромская	31,7	10	4,0	3,6	29,0
		Ярославская	32,9	17	4,2	1,5

Важным шагом на этом этапе исследования было определение типа почвы по его гранулометрическому составу, российская методика которого отличается от зарубежной, прежде всего, в разделении фракций песка и глины. В соответствии с используемым в России подходом к классификации механических элементов почв, фракция размером более 0,01 мм признается физическим песком,

а фракция размером менее 0,01 мм – физической глиной (Качинский, 1958). Таким образом, частицы размером <0,001 мм считаются илом, <0,25 – пылью, и <1 мм – песком. Тогда как в зарубежной литературе применяется подход, согласно которому глинистыми (clay) признаются частицы размером <0,002 мм, пылеватыми (silt) – частицы <0,05 мм, и песком (sand), соответственно, – частицы размером 0,05-2 мм (Дженик, 1975). Именно этот подход разделения по текстуре используется в DNDC. Чаще всего эта методика визуализируется с помощью треугольника Ферре (рис. 15), который был применен в настоящем исследовании для определения гранулометрического состава почвы.

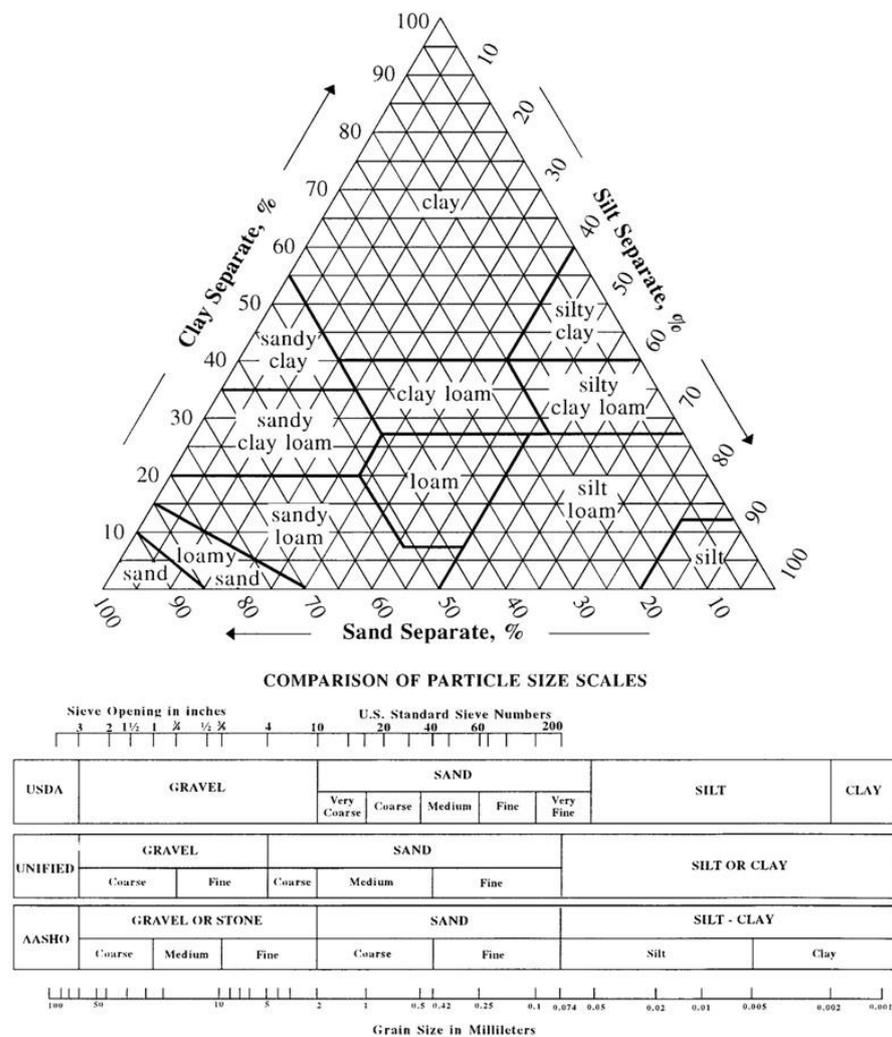


Рисунок 15. Определение гранулометрического состава почвы с помощью треугольника Ферре (Natural Resources Conservation Service)

Таблица 16. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в пахотных почвах Центрального Нечерноземья по литературным данным

Регион, опыт	Почва	Значение $C_{орг}$	Единицы измерения	Перевод в кг С/кг почвы	Источник
Мещерское Полесье, Владимирская обл., Судогодский р-н., стационарный опыт ВНИИОУ	Дерново-подзолистая супесчаная	0,62	% к весу почвы	0,0062	Лыков и др., 2004
Мещера, Владимирская обл., микрополевой опыт Владимирского НИИСХ	Дерново-подзолистая супесчаная, Поле при внесении различных удобрений Огород	540,6-2586,0	мг С/кг почвы	0,000541-0,002586	
		2600		0,0026	
Москва, Длительный опыт ТСХА	Дерново-подзолистая среднесуглинистая, Пар Озимая рожь и Ячмень Севооборот	0,26	% к весу почвы	0,0026	
		0,29		0,0029	
		0,28		0,0028	
Московская обл., г. Пущино, Опытная станция ИФХиБПП РАН	Серая лесная тяжелосуглинистая	1,1	% к весу почвы	0,011	Сапронов, 2008
Московская обл., Домодедовский р-н, Опыт ВНИИА	Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая	8,87	г С/кг сухой массы	0,00887	Алиев и др., 2011
Средняя по Центральному Нечерноземью				0,004455	
Средняя по Московской области				0,005634	

Растения. В соответствии с характеристиками сортов культур, возделываемых на Европейской территории России (Шевченко, 2002), были скорректированы показатели, представленные в модели DNDC, в частности, требуемые для созревания суммы активных температур и коэффициенты водопотребления. Ежегодные урожайности за период 1990-2017 гг. и структура посевных площадей по областям уточнялись на основе сведений Росстата (ЕМИСС).

Было принято, что вынос N на 1 т основной продукции составляет 35 кг для пшеницы, 29 кг для ячменя, 60 для подсолнечника, 5 для картофеля (Справочник агрохимика, 1976; Дудина и др., 1991). При пересчете на посевную площадь вынос N с урожаем составляет 61 для картофеля (Лукин, Марчук, 2011), 98-122 для пшеницы, 69-114 для гороха (Иванов, 1969), 190-214 для кормовой свеклы (Кидин и др., 2009) кг N /га.

Согласно нестрогой классификации, культуры могут быть разделены на группы по производственному принципу и назначению, например, на зерновые, зернобобовые, технические, кормовые, пропашные и другие (Посыпанов и др., 2007). К зерновым культурам обычно относят озимую пшеницу, озимую рожь, яровую пшеницу, ячмень; к техническим – лен, свеклу, подсолнечник, картофель, кормовую свеклу (Разработка типовых технологических карт, 2001). В нашем исследовании к категории зерновых культур были отнесены яровая и озимая пшеница, озимая рожь, ячмень, овес, просо (культуры, продукция которых включает зерно и солому); к пропашным – картофель, сахарная свекла, кукуруза, подсолнечник (культуры, в технологии возделывания которых присутствует одна или несколько междурядных обработок); к техническим – лен, рапс, горчица (культуры, биомасса которых полностью убирается с поля); к бобовым – горох и соя (азотфиксирующие культуры).

Следует упомянуть об отличиях в оценке растительной биомассы, применяемых в модели и в сельскохозяйственном производстве. В России традиционно растительная биомасса рассчитывается по методу Левина (Левин, 1977) и делится на основную продукцию, побочную продукцию, пожнивные

остатки и корни. В модели DNDC выделяют фракции зерна, стеблей, листьев и корней, между которыми устанавливается фиксированное соотношение.

В процессе моделирования полученная урожайность принималась нами за основную продукцию, стебли и листья, отчуждаемые с поля, – за побочную, отдельно выделялась фракция корней и устанавливалась определенная для каждой культуры доля вегетативной массы, учитываемая как поверхностные растительные остатки. На основании утвержденных методик (табл. 17) для основных сельскохозяйственных культур Центрального Нечерноземья определялось содержание углерода в растительной биомассе и корректировалось соотношение ее фракций.

Таблица 17. Определение растительной биомассы по урожайности основной продукции

Культура	Урожайность основной продукции (у), ц/га	Уравнения для определения массы (Левин, 1977)			Содержание С в биомассе (Распоряжение Минприроды, 2017), %
		Побочной продукции	Пожнивных остатков	Корней	
Озимая пшеница	10-25	$X=1,7y+3,4$	$X=0,4y+2,6$	$X=0,9y+5,8$	48,53
	26-40	$X=0,8y+25,9$	$X=0,1y+8,9$	$X=0,7y+10,2$	
Озимая рожь	10-25	$X=1,8y+3,8$	$X=0,3y+3,2$	$X=0,6y+8,9$	45,0
	26-40	$X=1,0y+25$	$X=0,2y+6,3$	$X=0,6y+13,9$	
Ячмень	10-20	$X=0,9y+6,5$	$X=0,4y+1,8$	$X=0,8y+6,5$	45,67
	21-35	$X=0,9y+7,2$	$X=0,09y+7,6$	$X=0,4y+13,4$	
Овес	10-20	$X=1,5y-1,2$	$X=0,3y+3,2$	$X=1,0y+2,0$	45,0
	21-35	$X=0,7y+16,2$	$X=0,15y+6,1$	$X=0,4y+16,0$	
Картофель	50-200	$X=0,12y+2,0$	$X=0,04+1,0$	$X=0,08y+4,0$	42,26
	201-350	$X=0,1y+3,9$	$X=0,03y+4,1$	$X=0,06y+8,6$	

Технологии возделывания. Самым сложным этапом было определение точных календарных дат проведения посева, уборки, вспашки, внесения удобрений в областях. Поэтому были использованы средние рекомендуемые даты и сроки проведения агротехнических мероприятий, указанные в типовых технологических картах (Грачев, 1980; Карпов, 2000). Глубина обработки почвы определялась по данным (Черкасов и др., 2008): вспашка на глубину 18-22 см, мелкая безотвальная обработка – на 12-18 см, поверхностная обработка – на 10-12 см. На основе сведений комплекса литературных источников в дальнейшем были разработаны пошаговые технологии возделывания ключевых культур Нечерноземья – озимой пшеницы и картофеля – с возможностью изменять сроки проведения почвообрабатывающих мероприятий.

Удобрения. Информация о вносимых под каждую культуру минеральных и органических удобрениях была рассчитана на основе данных бюллетеней Росстата «Внесение удобрений под урожай и проведение работ по химической мелиорации земель» (1990-2017 гг.). Количество азотных удобрений (16) рассчитывалось через соотношение общего объема азотных удобрений (тыс. т), внесенных под конкретную культуру в области, и удобренной площади (тыс. га), или путем пропорционального нахождения доли азотных удобрений от минеральных:

$$n_N = \frac{V_N}{S_{\text{мин}}} \approx \frac{V_N * n_{\text{мин}}}{V_{\text{мин}}}, \quad (16)$$

где n_N – доза азотных удобрений, кг/га; V_N – количество азотных удобрений, тыс. ц; $S_{\text{мин}}$ – площадь, удобренная минеральными удобрениями, тыс. га; $n_{\text{мин}}$ – доза минеральных удобрений, кг/га; $V_{\text{мин}}$ – общее количество минеральных удобрений, тыс. ц.

Содержание N в органических удобрениях принималось равным 0,5%, а C – 43% (Технология применения удобрений, 2009).

При оценке влияния элементов сельскохозяйственной практики на потоки CO₂ находилась средняя по Московской области доза минеральных азотных и органических удобрений за 1990-2014 гг., вносимая под каждую культуру (табл.

18). При анализе потоков CO₂ в пространстве и времени определялись ежегодные дозы удобрений в областях Центрального Нечерноземья с 1990 по 2017 гг.

Таблица 18. Среднее количество удобрений, вносимых в Московской области за 1990-2014 гг. (расчет по данным Внесение удобрений, 1990-2015)

Культура	Озимая пшеница		Картофель	
	Азотные минеральные, кг/га	Органические, т/га	Азотные минеральные, кг/га	Органические, т/га
Тип удобрений				
Количество	55,5 ± 19,7	3,5 ± 2,9	73,4 ± 27,9	13,9 ± 12,5

2.4. Оценка влияния внешних факторов на потоки CO₂

Была проведена комплексная оценка влияния внешних природных и антропогенных факторов на потоки CO₂ в агроландшафтах на примере Центрального Нечерноземья.

Оценка влияния природных факторов. Оценка влияния характеристик почвенного покрова (прежде всего, гранулометрического состава, или доли глинистых частиц) и метеорологических условий проводилась на примере картофеля, поскольку его вегетационный период охватывает один год, технология возделывания отличается наибольшим количеством почвообрабатывающих мероприятий, а сама культура оставляет малое количество пожнивных остатков. Доля глинистой фракции изменялась дискретно, основываясь на градации, используемой в модели. Для оценки влияния погодных условий были выбраны два смежных года: 2011 г., отличающийся высокими летними температурами и дефицитом осадков в вегетационный сезон, и 2012 г., характеризующийся избыточным увлажнением.

Для оценки влияния содержания органического углерода в почве на динамику эмиссии из нее CO₂ была выбрана озимая пшеница, поскольку при проведении исследования было отмечено, что озимые культуры отличаются

наименьшими потерями углерода из почвы в процессе возделывания. Моделирование проводилось для различных по гранулометрическому составу почв в отсутствие удобрений, при этом содержание $C_{\text{орг}}$ дискретно возрастало от 0 до максимально допустимого в модели (0,5 кг С/га).

Влияние биотических факторов – биологических особенностей культур – оценивалось на основе объединения сельскохозяйственных растений, наиболее широко представленных в структуре посевных площадей Московской области, в четыре группы с последующим нахождением средних значений эмиссии CO_2 из почвы.

В связи с ростом содержания парниковых газов в атмосфере важно было оценить отклик потоков CO_2 в агроландшафтах на повышение его атмосферной концентрации. Согласно данным ВМО (WMO GGB, 2017), в 2016 г. она составила 403 ppm и ежегодно увеличивается на 3 ppm. Прогноз составлялся на 25 лет, начиная с 2017 г., для двух полевых опытов, расположенных на Европейской части России – Курской биосферной станции ИГ РАН и Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН, при этом остальные входные параметры моделирования оставались неизменными. Оценивалась динамика четырех противоположно направленных потоков углерода в геосистемах – дыхания почвы, которое измерялось в этих Опытах, фотосинтеза, являющегося ключевым потоком CO_2 из атмосферы в биосферу и почву, чистого экосистемного обмена, или нетто-баланса CO_2 в экосистеме, и пула $C_{\text{орг}}$ в почве как основного хранилища С в агроландшафтах.

Оценка влияния антропогенных факторов. Для оценки влияния различных элементов сельскохозяйственной практики на компоненты биогеохимического цикла С был разработан условный севооборот, состоящий из шести вариантов агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы, а также две культуры различного типа – зерновую и пропашную. В каждый следующий вариант включались все предыдущие параметры, и вводился один дополнительный элемент (рис. 16):

- чистый пар (влияние почвенных и климатических условий, без антропогенного воздействия),
- чистый пар с обработкой почвы,
- возделывание озимой пшеницы и картофеля,
- озимая пшеница и картофель с внесением минеральных удобрений,
- те же культуры с внесением минеральных и органических удобрений,
- те же культуры с внесением двойных доз минеральных и органических удобрений.

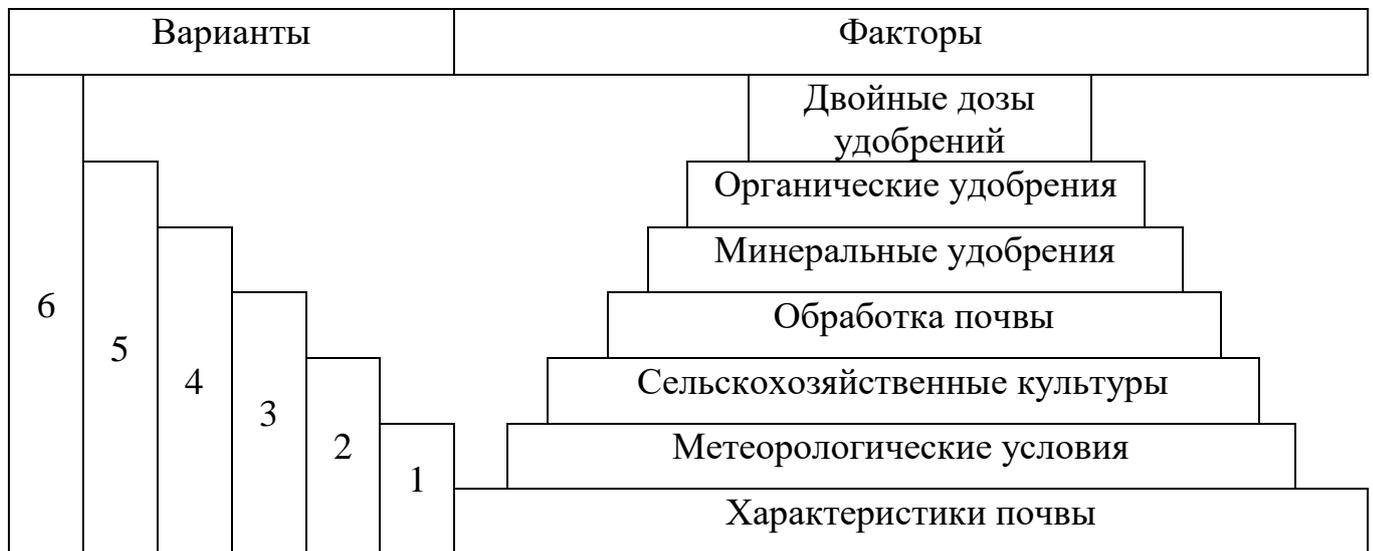


Рисунок 16. Варианты агроландшафтов для ступенчатого моделирования влияния антропогенных факторов на компоненты цикла С

Результаты анализировались не только по абсолютным итоговым значениям эмиссии парниковых газов и содержания С в почве, но и путем расчета относительных характеристик k (17) для различных параметров моделирования на основе соотношения с аналогичным значением в первом варианте (без антропогенного влияния):

$$k = \frac{x_n}{x_1}, \quad (17)$$

где k – коэффициент, относительное значение параметра; x_n – численное значение параметра в n -ном варианте; x_1 – численное значение параметра в первом варианте.

Изменение потоков CO_2 , являющихся предметом настоящего исследования, в агроландшафтах Центрального Нечерноземья в пространстве и времени оценивалось на основании официальной статистической информации. Источники данных были указаны и подробно рассмотрены выше. В рамках этой ретроспективы анализировались три ключевых потока:

- дыхание почвы – рассчитывалось как сумма корневого и микробного дыхания,
- чистый экосистемный обмен – рассчитывался как разница между фотосинтезом и дыханием экосистемы (суммой дыхания растений и микроорганизмов),
- динамика органического углерода в почве – рассчитывалась как разница между конечным и начальным содержанием $C_{\text{орг}}$ в почве за год.

При отборе входных данных вводились следующие ограничения:

- Наличие метеоданных в свободном доступе, при этом для анализа были взяты суточные максимальные и минимальные температуры воздуха и количество осадков,
- Преобладающий тип почвы занимает не менее 30% территории области,
- Непрерывный ряд возделывания культуры не менее 10 лет и доля в структуре посевных площадей не менее 5%.

В анализ были включены сведения за 1990-2017 гг., которые для дискретной оценки динамики потоков CO_2 разделялись на семилетия: 1990-1996 гг., 1997-2003 гг., 2004-2010 гг., 2011-2017 гг.

2.5. Статистический анализ

Оценка связей потоков CO_2 с гидротермическими условиями среды проводилась на основе полевых данных, сделанных в опытах непосредственно при измерении ключевого параметра.

Для анализа использовались методы описательной статистики: были определены средние величины, стандартные отклонения и другие характеристики выборки; а также корреляционный и регрессионный, кластерный и факторный методы анализа. Для проведения статистического анализа использовались пакеты программ IBM SPSS Statistics 20 и Microsoft Excel 2013.

Коэффициенты корреляции и регрессии признаются достаточными для подтверждения парных зависимостей процессов и явлений на различных уровнях геосистем (Cherkashin, Vibaeva, 2014). Достоверность коэффициентов корреляции Пирсона между потоками CO₂ и гидротермическими переменными оценивалась по уровню значимости $P = 0,05$.

Для построения регрессионных уравнений применялся метод пошаговой множественной линейной регрессии, в качестве независимых переменных использовались все измеренные метеопараметры (температура воздуха, температура почвы, влажность почвы и т.д.), зависимой переменной выступал поток CO₂ (дыхание почвы или чистый экосистемный обмен). Уровень значимости коэффициентов регрессии также составлял $P = 0,05$.

Многомерные методы анализа – кластерный и факторный – были реализованы с помощью пакета программы StatSoft Statistica 10.

При проведении многомерного факторного и кластерного анализа данные были нормированы (18) относительно стандартного отклонения для приведения их в единую систему измерений:

$$X_{\text{нормир}} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}, \quad (18)$$

где $X_{\text{нормир}}$ – нормированное значение переменной; X_i – измеренное значение переменной; \bar{X} – среднее значение переменной; σ – стандартное отклонение переменной (Камышова и др., 2012).

При разделении переменных на кластеры использовалось евклидово (простое геометрическое) расстояние с целью получить древовидную иерархическую структуру. Для определения расстояния между кластерами использовался метод Варда, основанный на минимизации внутрикластерной

дисперсии (StatSoft, 2012; Ward, 1963).

В процессе проведения факторного анализа переменные группировались на факторы согласно доле их дисперсии на основе собственных значений матрицы. Для максимизации изменчивости переменных использовался метод вращения исходных значений (варимакс). При определении оптимального количества факторов применялись критерии Кайзера (отбирались собственные значения выше 1) и критерии «каменистой осыпи» (определялось минимальное число факторов, при котором дальнейшее приращение описываемой дисперсии несущественно). Содержание выделенных факторов интерпретировалось на основе факторных нагрузок, представляющих собой корреляции между факторами и переменными (StatSoft, 2012). Далее была рассчитана регрессионная зависимость потоков CO₂ от полученных факторов, оценка адекватности которой проходила по тем же критериям, что и в случае использования исходных метеопеременных.

2.6. Оценка эффективности моделирования

По данным полевых опытов. Вследствие сложности математического аппарата модели (более 120 уравнений) и множества используемых переменных, напрямую не связанных с предметом исследования и целевыми показателями и никогда в полевых опытах не измерявшихся, достоверность получаемых на основе DNDC результатов должна быть оценена косвенно, минуя обратную задачу моделирования.

Для проверки эффективности моделирования и адекватности применяемых уравнений использовались коэффициенты Нэша-Саттклиффа E_m (19) и Тэйла T (20), оценивающие соотношения между реальными и расчетными значениями, коэффициенты корреляции Пирсона, однофакторный дисперсионный анализ, двухвыборочный F-тест для дисперсий, а также графический метод. Для расчетов использовалось программное обеспечение IBM SPSS Statisticst 20 и Microsoft Excell 2013.

Коэффициент эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа рассчитывался по формуле:

$$E_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{реал} - X_{модел})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{реал} - X_{сред})^2}, \quad (19)$$

где $X_{реал}$ – реальные, опытные, измеренные значения; $X_{модел}$ – смоделированные, рассчитанные значения; $X_{сред}$ – среднее реальное значение.

Значения коэффициента лежат в диапазоне $(-\infty; 1]$; если $E_m < 0$, это говорит о несостоятельности модели и, соответственно, чем он ближе к 1, тем точнее воспроизводится реальный процесс (Nash, Sutcliffe, 1970).

Коэффициент неравенства Тэйла рассчитывался по формуле:

$$T = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{реал} - X_{модел})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{реал}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{модел}^2}}, \quad (20)$$

где $X_{реал}$ – реальные, опытные, измеренные значения; $X_{модел}$ – смоделированные, рассчитанные значения.

Значения коэффициента T лежат в диапазоне $[0; 1]$, и чем ближе коэффициент к нулю, тем точнее моделирование. При исследовании природных процессов порог его значимости составляет $T \leq 0,3$ (Тэйл, 1977).

Корреляции между опытными и смоделированными значениями оценивались на основе коэффициента Пирсона при уровне значимости $P < 0,05$. Графический метод позволял зрительно сопоставить временную динамику параметров.

В рамках однофакторного дисперсионного анализа проверялась нулевая гипотеза: средние измеренные и средние смоделированные значения потоков CO_2 равны между собой. При двухвыборочном F-тесте проверялась нулевая гипотеза о равенстве дисперсий этих двух величин независимо от способа их получения – с помощью измерений или через моделирование (Камышова и др., 2012). В обоих случаях если $F_{реальн} < F_{критич}$ и $P > 0,05$, принималась нулевая гипотеза; если $F_{реальн} > F_{критич}$ и $P < 0,05$, нулевая гипотеза отвергалась и принималась альтернативная гипотеза о неравенстве средних или дисперсий и зависимости их значений от методики измерения и моделирования.

По данным литературных источников. При верификации модели DNDC на основе опубликованных в научной литературе данных реализовывалось два подхода:

- по компонентам биогеохимического цикла С,
- по содержанию С в растительной биомассе, рассчитанному по методу (Левин, 1977).

Для проверки способности модели адекватно оценивать характеристики биогеохимического цикла С использовали сравнение измеренных и рассчитанных DNDC по данным литературных источников значений, среди которых наиболее полно представлены эмиссия CO_2 и баланс $\text{C}_{\text{орг}}$. В рамках этого подхода основное внимание было уделено тому, чтобы максимально точно воспроизвести измеренные на опытных полях значения внешних условий и показателей, являющихся независимыми переменными модели, т.е. специфические характеристики почвы, метеорологические условия отдельных лет и других данные, представленные в опубликованных статьях. При отсутствии в них конкретных сведений использовались средние показатели по области. В случае отсутствия метеоданных в открытом доступе, использовались данные соседних областей (например, метеопараметры Московской области вместо Владимирской, и Брянской вместо Орловской).

Верификация по содержанию углерода в биомассе сельскохозяйственных культур проводилась на примере Московской области. Культуры были выбраны те же, которые встречались в блоке верификации по литературным источникам: озимая пшеница, ячмень, картофель, чтобы была возможность дополнительно сравнить полученные параметры.

2.7. Выводы

1. Использовалась имитационная модель DNDC (DeNitrification-DeComposition), воспроизводящая динамику основных компонентов биогеохимических циклов азота и углерода в почвах сельскохозяйственного

назначения. Для оценки влияния внешних условий на потоки CO_2 применялись корреляционный, регрессионный, кластерный и факторный методы анализа.

2. Верификация модели проводилась на основе данных трех полевых опытов, расположенных в различных почвенно-климатических условиях. Эффективность моделирования дыхания пахотных почв оценивалась на примере Курской биосферной станции ИГ РАН и Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН, точность воспроизведения чистого экосистемного обмена – на примере Опытного хозяйства СамГУ.

3. Вычислительные эксперименты по оценке потоков CO_2 в агроландшафтах за 1990-2017 гг. проводились для Центрального Нечерноземья, как одного из ключевых сельскохозяйственных районов России. Входная информация о климатических и почвенных условиях, культурах и технологиях их возделывания была собрана по данным литературных источников и официальной статистики.

4. Оценивалось влияние на потоки CO_2 природных факторов: характеристик почвенного покрова, метеорологических условий, содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве, биологических особенностей культур, повышения концентрации CO_2 в атмосфере. Для анализа воздействия элементов сельскохозяйственной практики были разработаны шесть вариантов агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы от чистого пара и неудобряемых посевов до интенсивных технологий с повышенными дозами удобрений.

5. Обоснована возможность оценки достоверности получаемых результатов моделирования с помощью пяти критериев эффективности: коэффициента Нэша-Сатклиффа, коэффициента Тэйла, коэффициента корреляции Пирсона, однофакторного дисперсионного анализа, двухвыборочного F-теста дисперсий, а также графического метода.

ГЛАВА 3. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОТОКОВ CO_2 В АГРОЛАНДШАФТАХ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ DNDC

Глава посвящена апробации и верификации модели DNDC по данным полевых экспериментов, оценке ее эффективности при воспроизведении потоков CO_2 в агроландшафтах по сравнению с регрессионным моделированием, а также статистическому анализу влияния гидротермических условий на динамику потоков CO_2 .

3.1. Верификация модели DNDC

По данным литературных источников. Признается, что основным способом проверки моделей является сравнение их выходных данных с результатами полевых наблюдений (Scurlock et al., 1999), или верификация, которая завершает процесс создания модели (Blagodatsky et al., 1998; Blagodatsky, Richter, 1998). Для модели DNDC была проведена подобная проверка путем сравнения ее результатов с данными полевых измерений, опубликованных в литературе.

При верификации модели было подтверждено, что DNDC демонстрирует высокую эффективность при работе с опытными данными, полученными на территории России. Было рассмотрено несколько примеров оценки эмиссии CO_2 и баланса С в агроценозах на различных типах почв (табл. 19) в Московской, Владимирской, Орловской областях. При воспроизведении каждого случая прорабатывались несколько возможных сценариев с изменением особенностей технологии возделывания, поскольку в отличие от климатических и почвенных условий эти сведения редко встречаются в литературных источниках.

Таблица 19. Верификация модели DNDC по результатам полевых измерений из литературных источников для условий Центрального Нечерноземья

Параметры	Модельные данные	Полевые данные					
		Полевая оценка	Культуры	Регион	Период, гг.	Почва	Ссылка
1	2	3	4	5	6	7	8
Годовой баланс С в почве, кг С га ⁻¹ год ⁻¹	162,6-277,7	250	Зернопаровой севооборот озимая пшеница – чистый пар	Пушино, Опытная станция ИФХиБПП РАН	2000-2004	Серая лесная тяжелосуглинистая	Сапронов, 2008
Эмиссия СО ₂ из почвы, кг С га ⁻¹ год ⁻¹	2258-3664	3304					
Эмиссия СО ₂ из почвы, кг С га ⁻¹ год ⁻¹	7420-8196	7850	Озимая пшеница	Орловская обл., запад	2013	Серая лесная	Карелин и др., 2017а
Годовой баланс С в почве, кг С га ⁻¹ год ⁻¹			Картофель	Владимирская обл., Длительный стационарный опыт ВНИИОУ	2004-2014	Дерново-подзолистая супесчаная, глееватая	Лукин, 2015
• Без удобрений	-247,6...-558,0	-1004					
• С удобрениями	+4987,9...+6111,0	+6016					
Эмиссия СО ₂ из почвы, кг С га ⁻¹ год ⁻¹							
• Без удобрений	427-800	1753					
• С удобрениями	1307-4074	3019					

Продолжение табл. 19							
1	2	3	4	5	6	7	8
Эмиссия CO ₂ из почвы, г м ⁻² ч ⁻¹	0,008-0,029	0,009-0,035	Бессменный чистый пар	Москва, Длительный полевой опыт ТСХА	2005- 2008	Дерново- подзолистая легкосуглин истая	Чистотин, Сафонов, 2016
	0,076-0,088	0,043-0,113	Бессменный ячмень				
	0,068-0,245	~ 0,600	Овес	Московская обл., УОПЭЦ «Чашниково»	Май- июль 2009	Дерново- подзолистая суглинистая	Гончарова, Телеснина, 2010
	0,075-0,175	0,054-0,324	Картофель	Москва, Центр точного земледелия, РГАУ-МСХА	Январь- август 2015	Дерново- подзолистая	Мазиров и др., 2015

Практически во всех примерах при моделировании баланса С и эмиссии CO_2 в агроценозах было получено соответствие расчетных и полевых показателей: средние измеренные величины находились внутри диапазона возможных значений по модели. Хотя в некоторых случаях она занижала данные: например, баланс С в варианте опыта с картофелем без удобрений во Владимирской области и пик эмиссии CO_2 в летнее время под овсом в Московской области.

В работах зарубежных авторов были отмечены случаи очень точного расчета на основе DNDC. Так, разница между рассчитанными моделью и измеренными в длительных полевых опытах значениями равновесного содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве на 8 участках пашни и 3 сенокосах, расположенных в Европе и Австралии, не превышала 0,7% от ее веса (Li et al., 1997). Хотя полевые данные в рассматриваемом примере были более вариабельны вследствие изменчивости урожайности культур, сорняков, особенностей управления растительными остатками, а также доли чистого пара в севооборотах.

На основе содержания углерода в биомассе. Второй подход к верификации состоял в проверке эффективности модели с помощью данных о содержании С в биомассе сельскохозяйственных культур, рассчитанном по их урожайности в Московской области.

Следует отметить различия между подходами к оценке фракций биомассы, используемыми в модели DNDC и в расчетном методе Левина (1977). Так, в DNDC в общей биомассе выделяются зерно, стебли, листья, корни и отдельно пожнивные остатки. В методе Левина биомасса делится на основную продукцию, побочную, надземные и корневые растительные остатки. В настоящем исследовании фракции идентифицировались следующим образом: зерно отождествлялось с основной продукцией, совокупность стеблей и листьев – с побочной продукцией, корни и стерня – с корневыми и надземными остатками. Наибольший интерес для настоящего исследования представляет последняя группа, поскольку после окончания вегетации культур пожнивные остатки непосредственно включаются в цикл С в почве.

Результаты моделирования в целом корректно отражают закономерности формирования и поступления в почву растительной биомассы и сопоставимы с реальными компонентами биогеохимического цикла С. Рассчитываемая DNDC на основе урожайности вегетативная масса (стебли + листья + корни) озимой пшеницы и ячменя практически полностью совпадает с биомассой, определяемой по методу Левина. Корреляции между значениями фракций растительной биомассы, определяемыми по двум методам, для зерновых культур были сильными (табл. 20). Фиксированное выделение фракции зерна создает некоторые трудности при работе с культурами, у которых оно не является основной продукцией – например, картофелем. В этом случае результирующее количество С, обращающегося в агроландшафте, в выходных данных модели может занижаться.

Таблица 20. Коэффициенты корреляции Пирсона между моделируемыми и наблюдаемыми значениями растительной биомассы

Культура	Вегетативная биомасса	Корневая биомасса	Пожнивные остатки
Озимая пшеница	$r_p = 0,80$ $P = 0,0002$	$r_p = 0,82$ $P < 0,001$	$r_p = 0,78$ $P < 0,001$
Ячмень	$r_p = 0,99$ $P = 0,0025$	$r_p = 0,95$ $P = 0,0385$	$r_p = 0,90$ $P < 0,001$
Картофель	$r_p = 0,56$ $P < 0,001$	$r_p = 0,56$ $P < 0,001$	$r_p = 0,69$ $P < 0,001$

Подход к верификации модели на основе расчета фракций биомассы и содержания С в ней фактически проведен нами впервые, что исключает возможность сравнить полученные результаты с данными других исследователей. В зарубежной практике модель показала высокую степень соответствия при анализе урожайности в кукурузно-соевом севообороте на суглинистой почве в штате Иллинойс (Tonitto et al., 2007a, 2007b), но в исследованиях, проведенных в

Китае и Японии, отмечались неопределенности в оценке корневой биомассы риса и неспособность модели отражать зависимость развития площади листовой поверхности от температуры (Fumoto et al., 2008). Также погрешности отмечались при моделировании поступающих в почву растительных остатков зерновых культур (Li et al., 2016).

3.2. Статистический анализ и моделирование эмиссии CO₂ на Курской биосферной станции ИГ РАН

На примере Курской биосферной станции ИГ РАН (КБС) была оценена способность модели DNDC предсказывать дыхание черноземной пахотной почвы под четырьмя культурами – озимой пшеницей, ячменем, картофелем и подсолнечником.

Согласно данным измерений, эмиссия CO₂ из почвы КБС значительно меняется в течение вегетационного периода и составляет от $0,138 \pm 0,068$ под ячменем до $0,173 \pm 0,115$ г С м⁻² ч⁻¹ под пшеницей по средним оценкам, или от $0,111$ под подсолнечником до $0,145$ г С м⁻² ч⁻¹ под пшеницей по медианам. Интенсивное дыхание почв лесостепной зоны Центрального Черноземья способствует формированию отрицательного баланса гумуса в пахотном слое, потери которого составляют $0,7-0,9$ т га⁻¹ год⁻¹ (Государственный доклад, 2014).

Значимые корреляции ($P < 0,05$) были получены для дыхания выщелоченного чернозема под ячменем, картофелем и подсолнечником с температурой почвы, но не с ее влажностью (табл. 21). Поэтому в уравнениях регрессии для подсолнечника (21), ячменя (22) и картофеля (23 и 24) в качестве независимой переменной для оценки эмиссии использовалась только температура почвы на глубине 5 см (T_5) и 10 см (T_{10}):

- Подсолнечник $X = 0,013T_5 - 0,112$ ($R^2 = 0,27, P = 0,04$) (21);
- Ячмень $X = 0,006T_5 + 0,021$ ($R^2 = 0,27, P = 0,03$) (22);
- Картофель (1) $X = 0,010T_5 - 0,061$ ($R^2 = 0,31, P = 0,03$) (23);
- Картофель (2) $X = 0,011T_{10} - 0,064$ ($R^2 = 0,32, P = 0,02$) (24).

Таблица 21. Зависимость эмиссии CO₂ из почвы от ее температуры на КБС

Показатели	Культуры			
	Ячмень	Подсолнечник	Картофель	
Температура почвы на глубине	5 см	5 см	5 см	10 см
Коэффициент корреляции Пирсона, r_p	0,522	0,518	0,552	0,568
P	0,031	0,040	0,026	0,022

Для дыхания почвы под озимой пшеницей значимых корреляций и регрессий с гидротермическими параметрами среды получено не было. Хотя в Орловской области, граничащей с Курской, эмиссия на участке этой культуры, как и в Опыте КБС для трех других культур, зависела от температуры почвы и воздуха ($R^2=0,46$), а влажностные характеристики значимого влияния не оказывали (Карелин и др., 2017а).

Это отличается от ожиданий, поскольку влажность почвы является одним из определяющих условий образования и транспорта в ней CO₂, а Курская область относится к зоне неустойчивого увлажнения (Смолянинов, Стародубцев, 2011). Кроме того, от такой влаголюбивой культуры как подсолнечник обычно ожидается заметная реакция на изменение увлажнения (Hall et al., 1990).

Вероятнее всего, такой результат связан со сложившимся влажностным режимом, отличающимся от среднего многолетнего. Обычно в пахотных черноземах формируется специфический режим увлажнения, при котором наибольшее влагосодержание в почве отмечается весной и осенью, когда на фоне пониженных температур происходит выщелачивание карбонатов, что дополнительно увеличивает концентрацию CO₂ в почвенном воздухе (Русский чернозем, 1983). В рассматриваемом 2017 г. наибольшее количество осадков и пик влажности почвы приходились на летнее время, в связи с чем дефицита доступной влаги не наблюдалось, и температура почвы оказывала большее влияние на дыхание корней и микроорганизмов.

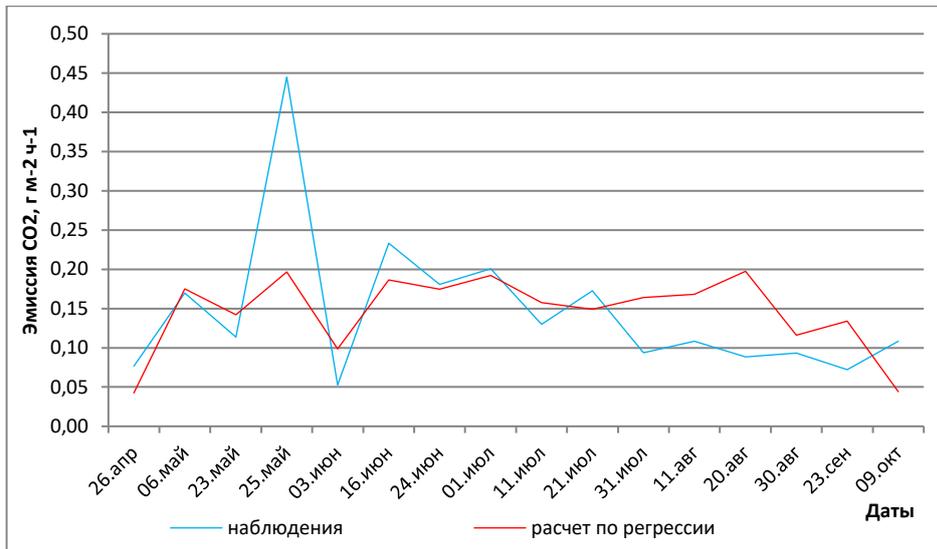
В другие годы наблюдений в том же районе на посевах ячменя были

получены значимые коэффициенты корреляции и регрессии между дыханием почвы, ее температурой и влажностью (Карелин и др., 2015). Аналогично, в исследовании (Нагорная, 2008) эмиссия CO_2 из почвы зависела как от температуры, так и от влажности, при этом оптимальные условия для образования CO_2 складывались при температуре $+23-25^\circ\text{C}$ (под паром до $+30^\circ\text{C}$) и объемной влажности почвы 20-25%. Также была отмечена обратная пропорциональная зависимость между дыханием почвы и гидротермическими параметрами (Тембо и др., 2014). И наоборот, значимых корреляций для эмиссии CO_2 из почвы ни с ее температурой, ни с влажностью не наблюдалось (Сушко и др., 2016).

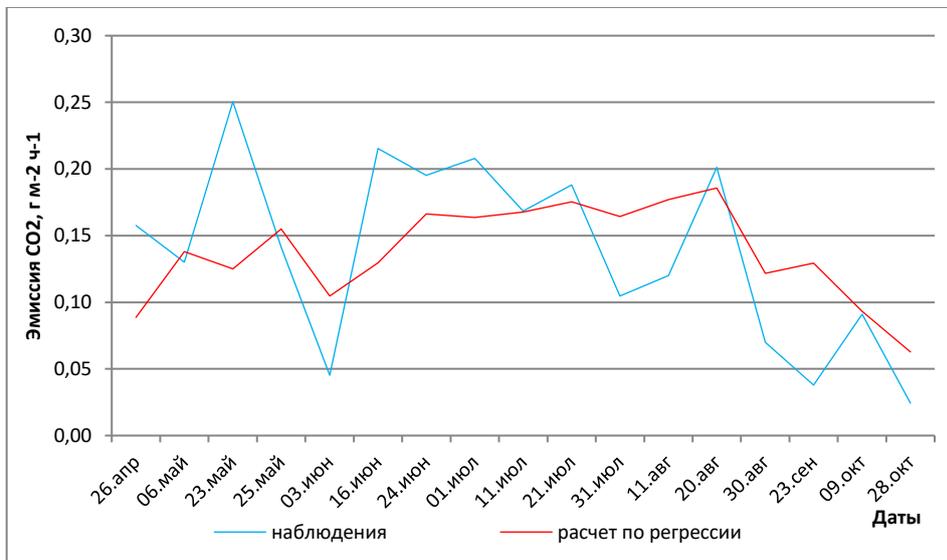
Рассчитанные на основе регрессионной зависимости значения эмиссии CO_2 из почвы представлены на рисунке 17. Они отличаются средними корреляциями с измеренными величинами, но неверно оценивают их дисперсию (табл. 22).

Графический анализ результатов моделирования с помощью DNDC позволяет увидеть совпадение наблюдаемой и расчетной внутрисезонной динамики дыхания почвы под подсолнечником и ячменем (рис. 18). Для озимой пшеницы модель, в отличие от наблюдений, прогнозирует резкий спад почвенного дыхания 3 июня. Но этот спад присутствует у всех культур и объясняется существенным падением температуры воздуха и почвы в этот период.

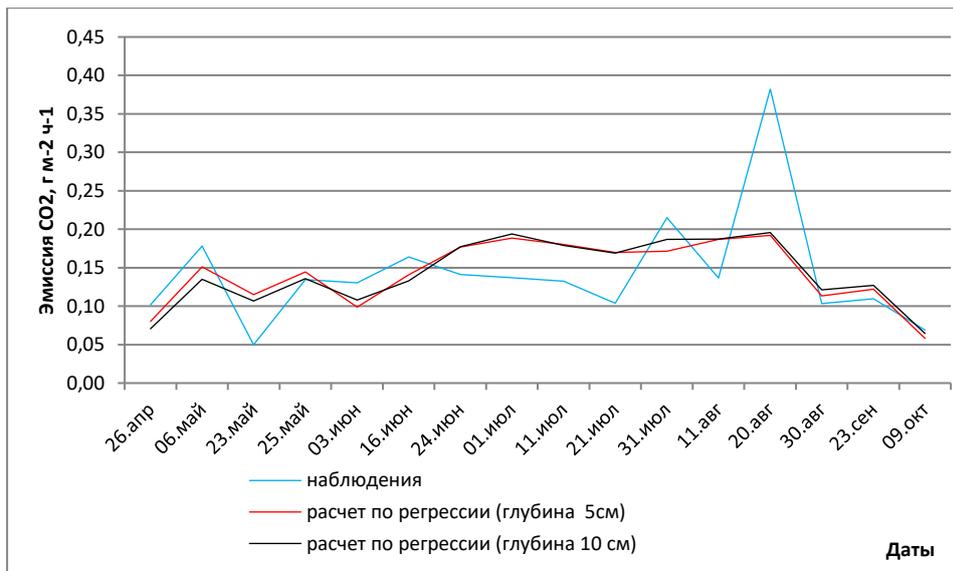
Полученные с помощью DNDC значения эмиссии CO_2 соответствовали измеренным в опыте (табл. 22). Для всех культур коэффициенты Тэйла были ниже 0,30, что подтверждает высокое качество выходных данных модели. По результатам однофакторного дисперсионного анализа для четырех культур принимается нулевая гипотеза о равенстве средних, полученных на основе полевых измерений и с помощью моделирования. Двухвыборочный тест дисперсий полевых результатов и моделирования показал их несхожесть для картофеля и пшеницы, но равенство для подсолнечника и ячменя. В аналогичных исследованиях в Ирландии DNDC также продемонстрировала высокую эффективность при оценке почвенной эмиссии CO_2 в агроценозе ярового ячменя, где она недооценила ее величину лишь на 9% (Abdalla et al., 2011).



Подсолнечник

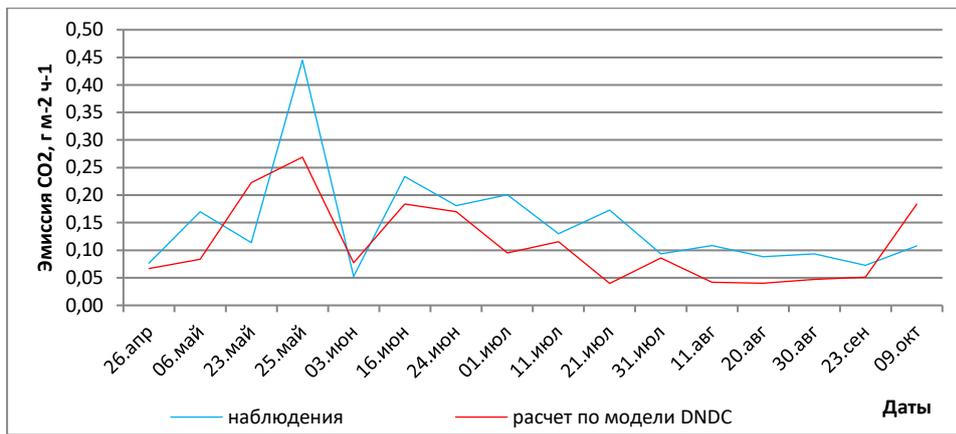


Ячмень



Картофель

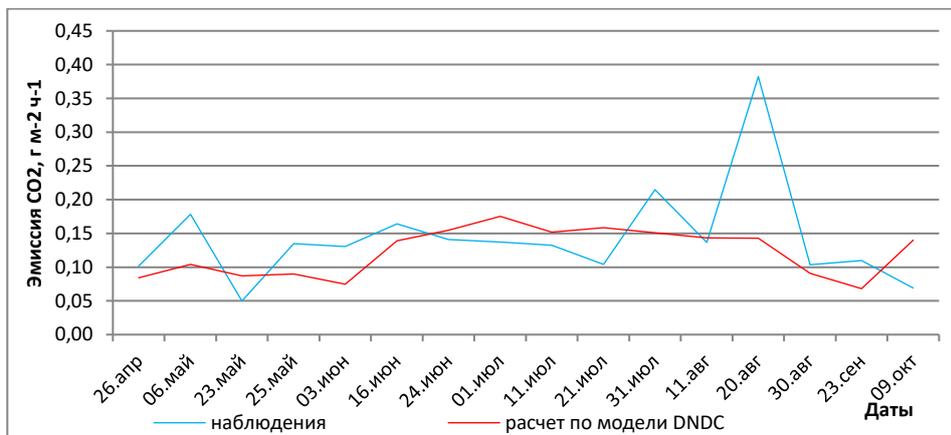
Рисунок 17. Наблюдаемые и рассчитанные на основе регрессии значения эмиссии CO₂ из почвы в Опыте КБС в ходе вегетационного сезона 2017 г.



Подсолнечник



Ячмень



Картофель

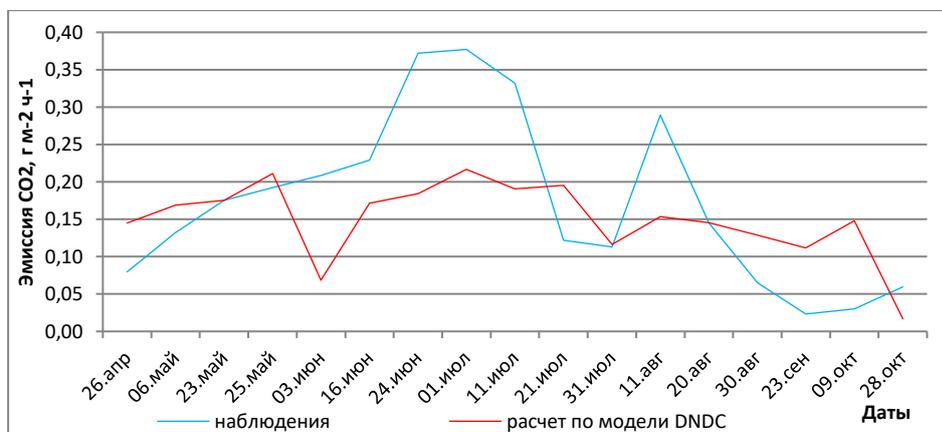
Озимая
пшеница

Рисунок 18. Наблюдаемые и рассчитанные на основе DNDC значения эмиссии CO₂ из почвы в Опыте КБС в ходе вегетационного сезона 2017 г.

Таблица 22. Оценка эффективности моделирования эмиссии CO₂ из почвы различными методами в Опыте КБС

Тип моделирования Почвенная эмиссия		Культуры							
		Подсолнечник		Ячмень		Картофель			Пшеница
		DNDC	регрессия	DNDC	регрессия	DNDC	регрессия 1 (T ₅)	регрессия 2 (T ₁₀)	DNDC
Средняя, г С м ⁻² ч ⁻¹	Опыт	0,146 ± 0,095		0,138 ± 0,068		0,143 ± 0,075			0,173 ± 0,115
	Модель	0,111 ± 0,072	0,146 ± 0,049	0,160 ± 0,063	0,138 ± 0,036	0,122 ± 0,035	0,143 ± 0,041	0,143 ± 0,043	0,150 ± 0,051
	<i>N</i>	16		17		16			17
Медиана, г С м ⁻² ч ⁻¹	Опыт	0,111		0,141		0,134			0,145
	Модель	0,085	0,161	0,184	0,138	0,140	0,148	0,135	0,154
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,256	0,268	0,023	0,132	-0,021	0,306	0,323	0,230
	Тэйла	0,263	0,240	0,202	0,190	0,256	0,196	0,193	0,268
Коэффициенты корреляции	<i>r_p</i>	0,662	0,514	0,533	0,522	0,300	0,553	0,569	0,531
	<i>P</i>	0,005	0,042	0,028	0,031	0,259	0,026	0,022	0,028
Однофакторный дисперсионный анализ	<i>F</i>	1,405	0,000	0,975	0,000	1,020	0,000	0,000	0,591
	<i>F_{крит}</i>	4,171	4,171	4,149	4,149	4,171	4,171	4,171	4,149
	<i>P</i>	0,245	0,999	0,331	0,999	0,321	0,999	0,999	0,448
Двухвыбороч- ный F-тест для дисперсий	<i>F</i>	1,707	3,730	1,186	3,665	4,559	3,270	3,104	4,989
	<i>F_{крит}</i>	2,403	2,403	2,333	2,333	2,403	2,403	2,403	2,333
	<i>P</i>	0,156	0,008	0,368	0,006	0,002	0,014	0,018	0,001

Даже при относительно небольшом числе полевых наблюдений ($N < 20$) и недостатке входной информации имитационная модель за счет заложенных в нее закономерностей позволяет с достаточно высоким приближением воспроизвести дыхание почвы. Этот пример, который можно считать успешным, подтверждает применимость имитационного моделирования как инструмента для анализа ландшафтных процессов.

3.3. Статистический анализ и моделирование эмиссии CO₂ на Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН

Способность DNDC моделировать эмиссию CO₂ из пахотной почвы была также оценена на примере зернопарового севооборота (озимая пшеница – чистый пар) на серых лесных почвах Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН.

Согласно данным многолетних круглогодичных полевых измерений, интенсивность почвенной эмиссии CO₂ в зернопаровом севообороте в среднем составляет $0,046 \pm 0,048$ г С м⁻² ч⁻¹, меняясь за год от близких к нулевым значениям зимой до величин, превышающих $0,250$ г С м⁻² ч⁻¹ летом. Но при оценке потока CO₂ с помощью камерного метода, использованного в данном исследовании, результаты измерений могут быть завышены примерно на 10% (Rayment, 2000).

Эти значения эмиссии ниже, чем в естественных ценозах, поскольку вследствие меньшего поступления растительных остатков почвы агроландшафтов отличаются более низкой удельной годовой биологической активностью. Так, под луговой растительностью на серых лесных почвах эмиссия CO₂ составляла от $0,086$ (Курганова, 2010) до $0,132$ (Карелин и др., 2017а) г С м⁻² ч⁻¹. Аналогично, суммарная летняя эмиссия CO₂ была равна 179 ± 32 г С м⁻² в изучаемом агроценозе и 255 ± 32 г С м⁻² в луговых ценозах на том же типе почв (Kudeyarov, Kurganova, 2005).

Показатели эмиссии, наблюдаемые в Опыте, также довольно низкие по сравнению с удобряемыми агроценозами умеренного климатического пояса, где

значения этого потока примерно в четыре раза превышают их. Так, если средняя эмиссия CO_2 в посевах озимой пшеницы в Опыте ИФХиБПП РАН составляла $0,050 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, то для яровой пшеницы на черноземных почвах Самарской области этот показатель был равен $0,212 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ при глубокой вспашке и $0,218 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ без осенней обработки (Марковская и др., 2015). Дыхание почвы под паром в Московской области было равно $0,037 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, тогда как на удобряемых черных парах в Великобритании оно составляло $0,138 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ и колебалось от $0,003\text{-}0,015 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ зимой до $0,113\text{-}0,208 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ в конце вегетационного периода (Koerber et al., 2010).

Температура воздуха, температура почвы и влажность почвы являются важнейшими абиотическими факторами, регулирующими процессы образования и эмиссии CO_2 с поверхности почвы, при этом компоненты ее дыхания могут по-разному реагировать на изменение температурных и влажностных условий окружающей среды (Евдокимов и др., 2010). На рисунке 19 хорошо видно, что внутригодовая динамика интенсивности эмиссии CO_2 совпадает с изменениями температуры верхнего слоя почвы и противоположна колебаниям его влажности. Температурный коэффициент Q_{10} для этого агроценоза составляет в среднем 2,3, но для осенних и весенних периодов он достигает 3,2-3,6 (Lopes de Gerenyu et al., 2005).



Рисунок 19. Динамика температуры и влажности почвы в слое 0-5 см и эмиссии CO_2 из агросерой лесной почвы в Опыте ИФХиБПП РАН

В пахотных почвах антропогенный фактор нарушает естественные функциональные связи между компонентами ландшафта вследствие чего связь эмиссии CO_2 с гидротермическими параметрами выражена слабо. Наиболее тесные корреляции ($r_p = 0,47-0,60$; $P < 0,001$) были выявлены между интенсивностью выделения CO_2 из серых лесных почв и температурой почвы и воздуха в посевах пшеницы и в севообороте в целом (табл. 23), что говорит об их преимущественном влиянии на динамику выделения CO_2 . Для парующих участков отмечается лишь слабая корреляция между эмиссией CO_2 и температурой почвы. Влияние влажности почвы на ее дыхание проявлялось только в годы возделывания пшеницы, причем связь между этими параметрами была обратной. В работе (Лопес де Гереню и др., 2001) была выявлена аналогичная значимая слабая положительная зависимость эмиссии CO_2 от температуры почвы ($r_p = 0,40$, $P < 0,05$) и сильная – от ее влажности в летнее время ($r_p = 0,74$, $P < 0,05$). Это говорит о том, что в летний период влажность почвы является лимитирующим фактором для формирования ее дыхания.

Таблица 23. Коэффициенты корреляции Пирсона между эмиссией CO_2 из почвы и ее гидротермическими характеристиками в Опыте ИФХиБПП РАН

Переменные	Севооборот	Пар	Пшеница
Температура воздуха	$r_p = 0,465$ $P < 0,001$	незначим	$r_p = 0,540$ $P < 0,001$
Температура почвы на глубине 5 см	$r_p = 0,507$ $P < 0,001$	$r_p = 0,239$ $P = 0,010$	$r_p = 0,595$ $P < 0,001$
Влажность почвы	незначим	незначим	$r_p = -0,203$ $P = 0,002$

Были построены двухфакторные регрессионные уравнения, характеризующие зависимость эмиссии CO_2 от температуры (T_p) и влажности ($В_p$) почвы для севооборота в целом (25) и для посевов озимой пшеницы (26):

- Севооборот

$$X = 0,0042 T_{\text{п}} + 0,0013 B_{\text{п}} - 0,0202 \quad (25)$$

$(R^2 = 0,313, P < 0,001, N = 441),$

- Пшеница

$$X = 0,0049 T_{\text{п}} + 0,0014 B_{\text{п}} - 0,0264 \quad (26)$$

$(R^2 = 0,411, P < 0,001, N = 320).$

Температура воздуха в качестве переменной в уравнения регрессии не включалась, поскольку для нее были отмечены высокие корреляции с температурой почвы. Для паровых участков регрессия оказалась незначимой.

Значения коэффициента детерминации позволяют сделать вывод о том, что гидротермические факторы описывают 31-41% дисперсии дыхания агросерых почв. Для среднемесячных потоков CO_2 из серых лесных почв того же агроценоза ранее были рассчитаны эмпирические множественные линейные регрессионные ($R = 0,46-0,67$) (Курганова и др., 2011) и экспоненциальные ($R = 0,62-0,68$) (Lopes de Gerenyu et al., 2005) модели. В качестве переменных в них фигурировали среднемесячные температуры воздуха, почвы и количество осадков, которые, соответственно, объясняли более 60% дисперсии дыхания почвы.

На рисунке 20 представлено сравнение измеренных величин эмиссии CO_2 из почвы агроценоза и рассчитанных на основе двухфакторного регрессионного уравнения. Наилучшим образом оно проявляет себя в среднем диапазоне значений дыхания почв: примерно от 0 до $100 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Пики эмиссии CO_2 в летний период уравнения не предсказывают, значительно их занижая.

Модель DNDC с суточным шагом рассчитывает более 50 параметров биогеохимического цикла С, связанных с динамикой органического вещества в почве и развитием растений, в том числе отдельно оценивает компоненты дыхания почвы: дыхание почвенных микроорганизмов и корней растений. Рассчитываемое моделью дыхание почвы практически полностью совпадает по диапазону значений и внутригодовой динамике (чередованию максимумов и минимумов) с измеренными в Опыте значениями (рис. 21).

Пики и спады в годовом ходе измеренных и смоделированных значений микробного дыхания также совпадают. Хотя при воспроизведении почвенного

дыхания на орошаемых посевах хлопка в Китае модель недооценивала гетеротрофное дыхание почвы на 59% и, соответственно, общую эмиссию CO_2 на 15%, несмотря на то, что расчетные и измеренные значения отличались высокими корреляциями (Yu, Zhao, 2015).

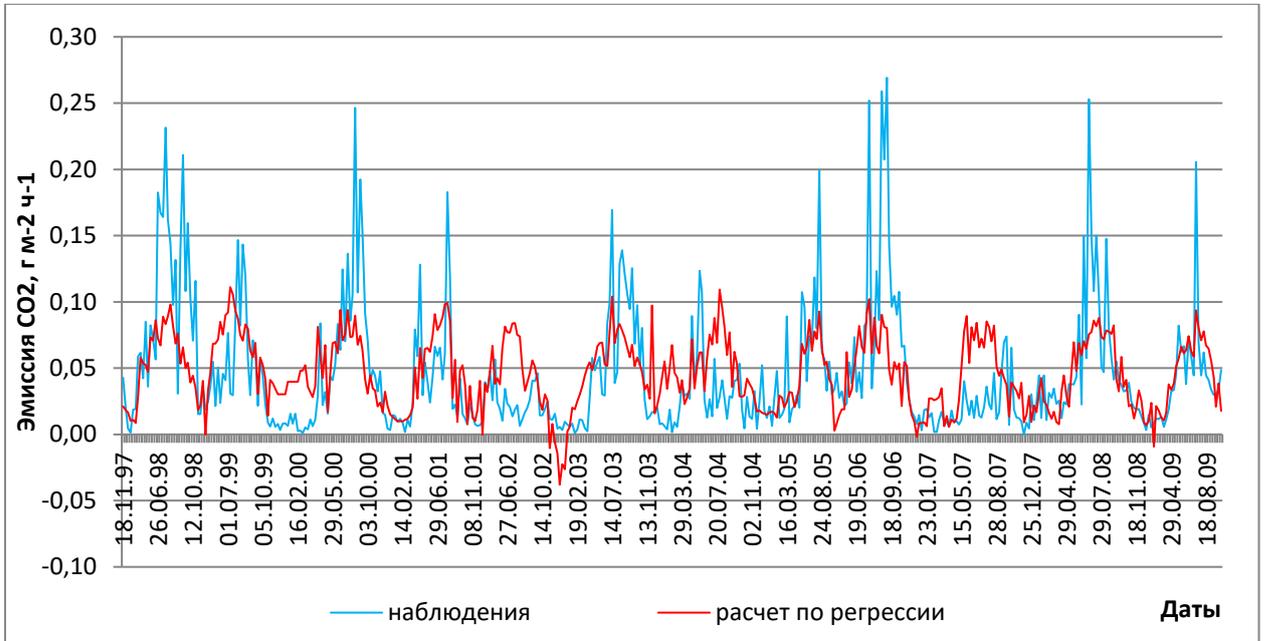


Рисунок 20. Наблюдаемые и рассчитанные на основе регрессионных уравнений значения эмиссии CO_2 из почвы в опыте ИФХиБПП РАН

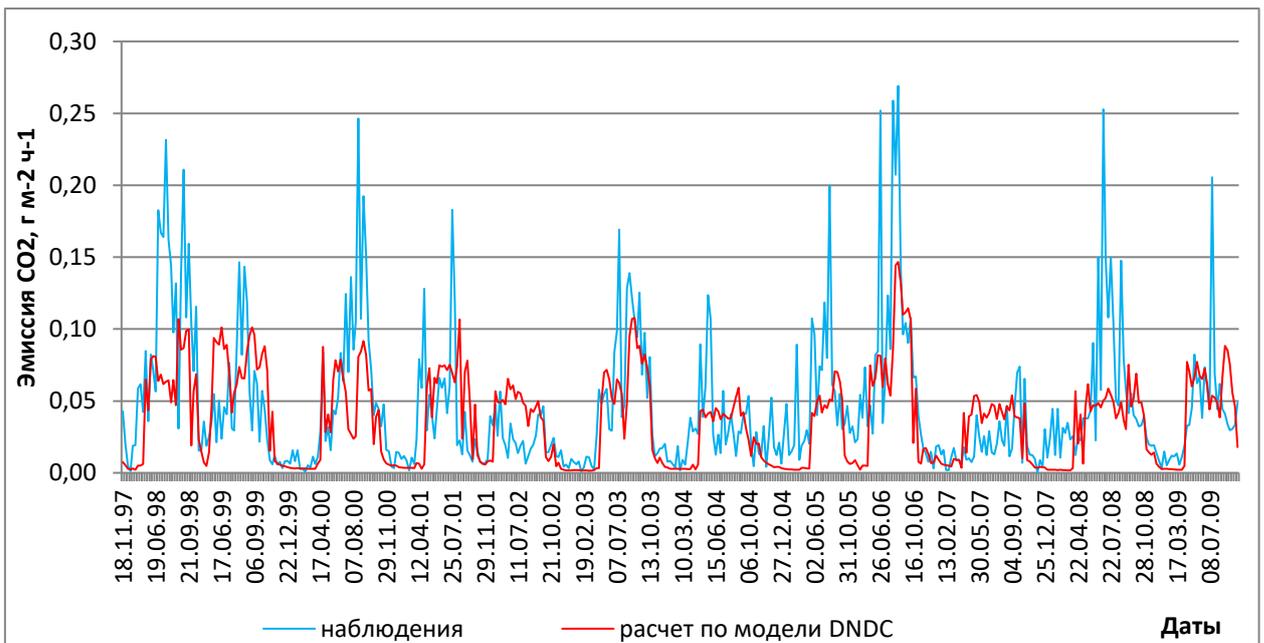


Рисунок 21. Наблюдаемые и рассчитанные на основе модели DNDC значения эмиссии CO_2 из почвы в опыте ИФХиБПП РАН

Недостатком модели, выявленным еще ранее при ее верификации, является отсутствие отражения в некоторые годы пиков эмиссии CO_2 в летнее время, прежде всего, за счет уменьшения дыхания корней. Это связано со встроенной в модель функцией снижения роста растений, прежде всего, вследствие превышения оптимального температурного порога, пересыхания пахотного слоя почвы в период активного роста и недостатка в нем доступных форм азота. Кроме того, эта функция предусматривает снижение дыхания корней после начала формирования зерна. Даже в условиях повышения уровня грунтовых вод и внесения азотных удобрений, подобный спад корневого дыхания все равно присутствует.

Такой подход можно считать оправданным, поскольку температурный, водный и азотный стресс, действительно, способствуют снижению дыхания почвы (Luo, Zhou, 2006; Zhang et al., 2002). Кроме того, спад эмиссии CO_2 из-за недостатка влаги и пересыхания почвы в июне-июле с дальнейшим усилением дыхания при поступлении растительных остатков в почву в конце лета после уборки урожая отмечался в Опыте ИФХиБПП РАН ранее (Сапронов, Кузяков, 2007; Курганова и др., 2011).

Количественные характеристики дыхания почвы сильно зависят от метода определения (Larionova et al., 2006). Камерный метод, использованный в настоящем исследовании, оптимален для оценки совокупного дыхания почвы, но определить вклады корневого дыхания и дыхания микроорганизмов наиболее точно можно только с помощью лабораторного метода субстрат-индуцированного дыхания (Ларионова и др., 2006). В полевых же условиях реализовать его и разделить общий поток CO_2 из почв на составляющие – довольно трудоемкая задача (Евдокимов и др., 2010), в то время как модель DNDC позволяет решить эту проблему.

По результатам проведенного моделирования для озимой пшеницы, на долю микробного дыхания приходится в среднем 66,8%, на долю дыхания корней – 33,2%, что совпадает с оценками, проведенными в том же эксперименте ранее. Так, по данным (Курганова, 2010; Kudeyarov, Kurganova, 2005), доля корневого

дыхания в агроценозах этой культуры составляет 34% (медиана) – 38% (среднее). Аналогичные данные приводятся в работе (Ларионова и др., 2003), где доля дыхания корней озимой пшеницы оценивается в 33%, варьируя от 10% до 58%, и зависит не только от типа почвы, типа экосистемы и гидротермических условий, но и от продолжительности вегетационного периода.

Исходя из значений коэффициентов эффективности моделирования (табл. 24) – значимых корреляций и положительных критериев Нэша-Сатклиффа, – DNDC достаточно корректно рассчитывает дыхание агросерой почвы в зернопаровом севообороте. На парующей почве эмиссия CO_2 , представленная только микробным дыханием, моделируется ею с высокой точностью. Уравнения регрессии хорошо предсказывают величину эмиссии CO_2 под посевами пшеницы.

3.4. Статистический анализ и моделирование баланса CO_2 в экосистеме в Опытном хозяйстве СамГУ

На примере полупустынных пастбищ на серо-бурых почвах Учебного хозяйства СамГУ была оценена способность DNDC моделировать нетто-баланс CO_2 в экосистеме, или чистый экосистемный обмен (NEE).

Согласно данным, полученным с помощью мини-метеорологической установки, полупустыни Узбекистана являются нетто-источниками поступления CO_2 в атмосферу: среднее многолетнее значение баланса CO_2 здесь составляет $0,121 \pm 0,148 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Исходя из того, что в течение суток содержание CO_2 в приземном слое атмосферы изменяется в зависимости от соотношения режимов дыхания и фотосинтеза (Степанов, 2011), в данном случае можно предположить, что поток, связанный с валовым дыханием, представленный преимущественно дыханием почвы, превышает низкую валовую продукцию. Абсолютные максимальное (наибольшая эмиссия) и минимальное (наибольшее поглощение) значение потока CO_2 отмечены в первый год измерений – 1998 г. – и составляют 0,594 и -0,691 $\text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно.

Таблица 24. Оценка эффективности моделирования эмиссии CO₂ из почвы различными методами в Опыте ИФХиБПП РАН

Показатели		Севооборот		Пшеница		Пар	
		DNDC	регрессия	DNDC	регрессия	DNDC	регрессия
Средняя, г м ⁻² ч ⁻¹	Опыт	0,046 ± 0,048		0,050 ± 0,048		0,037 ± 0,046	
	<i>N</i>	441		320		121	
	Модель	0,036 ± 0,032	0,046 ± 0,030	0,035 ± 0,031	0,050 ± 0,032	0,040 ± 0,033	0,037 ± 0,009
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,290	0,313	0,197	0,411	0,520	0,057
	Тэйла	0,352	0,331	0,374	0,292	0,287	0,434
Коэффициенты корреляции	<i>r_p</i>	0,582	0,560	0,546	0,641	0,723	0,239
	<i>P</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,010
Однофактор- ный дисперсионный анализ	<i>F</i>	13,297	0,000	21,116	0,000	0,211	0,000
	<i>F_{крит}</i>	3,852	3,852	3,856	3,856	3,880	3,880
	<i>P</i>	< 0,001	1,000	< 0,001	1,000	0,646	< 0,001
Двухвыборочный F-тест для дисперсий	<i>F</i>	2,320	3,190	2,476	2,430	1,913	17,457
	<i>F_{крит}</i>	1,170	1,170	1,204	1,201	1,347	1,362
	<i>P</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Преимущественно эмиссионный характер нетто-баланса полупустынь объясняется, главным образом, тем, что эти ландшафты представляют собой площади с оголенным грунтом, покрытым редкой растительностью. Функционирование подобных ландшафтов в качестве нетто-источников CO₂ подтверждается в работе (Романовская, Карабань, 2008), где отмечено, что почвы южных областей, теплый климат которых способствует усиленной минерализации органического вещества, теряют углерод. Хотя в отношении полынных экосистем Узбекистана есть данные о том, что при повышении плотности растений они становятся нетто-поглотителями C (Насыров, 2009). С

другой стороны, баланс CO_2 зависит от интенсивности использования пастбищ: умеренный выпас уменьшает эмиссию, повышая потенциал секвестрации, тогда как интенсивный высвобождает CO_2 (Kang et al., 2013).

Корреляционный анализ указал на наличие слабых положительных зависимостей нетто-баланса CO_2 от температурных параметров среды (температуры воздуха и потока тепла от почвы) и отрицательных зависимостей – от влажностных (влажности воздуха, влажности почвы, количества осадков и эвапотранспирации) (табл. 25). Корреляции с остальными метеопараметрами были незначимыми.

Таблица 25. Зависимость чистого экосистемного обмена от метеорологических переменных в Опыте СамГУ

Параметры	Температура воздуха	Поток тепла от почвы	Эвапотранспирация	Сумма осадков за сутки	Влажность почвы	Влажность воздуха
Коэффициент корреляции Пирсона, r_p	0,327	0,242	-0,207	-0,230	-0,263	-0,327
P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Коэффициент корреляции между температурой воздуха и количеством осадков отрицательный ($R = -0,28$, $P < 0,001$), следовательно в течение вегетационного сезона динамика их противоположна, т.е. в период выпадения осадков температура воздуха снижается, а кривая нетто-потока CO_2 меняет свои значения на отрицательные (рис. 22).

Влага, как лимитирующий фактор в аридных районах, увеличивает интенсивность фотосинтеза, вследствие чего соотношение поглощения и эмиссии CO_2 меняется в сторону депонирования, т.е. фиксации CO_2 с последующим образованием органического вещества растениями. Таким образом, после выпадения осадков регион кратковременно становится стоком углерода.

Аналогичные выводы о влиянии осадков на изменение баланса CO_2 с эмиссии на поглощение в аридных ландшафтах получены для полупустынь Аризоны, США (Scott et al., 2010) и степей Монголии (Наоа et al., 2013).

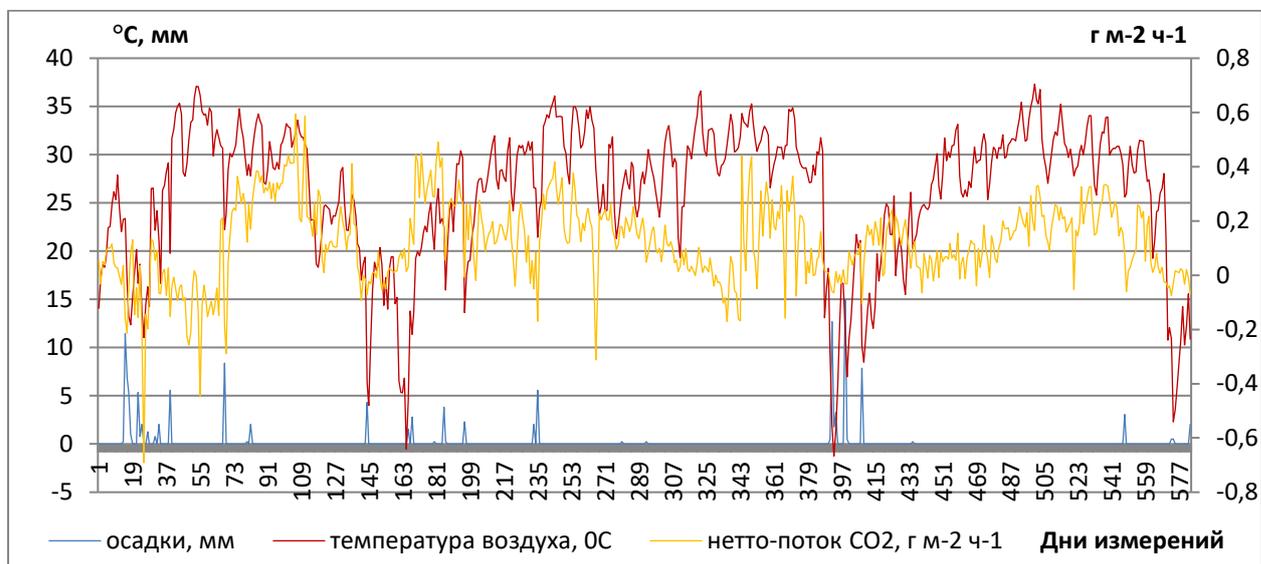


Рисунок 22. Соотношение температуры воздуха (основная ось), количества осадков и баланса CO_2 (вспомогательная ось) в Опыте СамГУ

Вероятнее всего, это происходит в результате активизации процесса фотосинтеза, хотя возможно, что уменьшается дыхание почвы при сохранении того же уровня фотосинтеза, или снижаются оба потока, но дыхание ослабляется более интенсивно. В работе (Козунь, 2014) подтверждается, что в аридных условиях отмечаются прямые зависимости биологических показателей от количества осадков и обратные от амплитуды температур.

Кластерный анализ позволяет разбить исследуемые величины на связанные между собой иерархические совокупности. Результаты его показали, что все метеопараметры делятся на два кластера (рис. 23). При этом поток CO_2 образует отдельную совокупность с такими переменными как солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация, теплообмен, поток тепла от почвы и температура воздуха. Этот кластер решено было назвать температурно-радиационным. Второй кластер образован влажностными переменными: осадками, влажностью почвы, относительной влажностью воздуха и

испаряемостью. Таким образом, кластеризация дает четкое представление о тесных связях потока CO_2 с температурными и радиационными условиями местности.

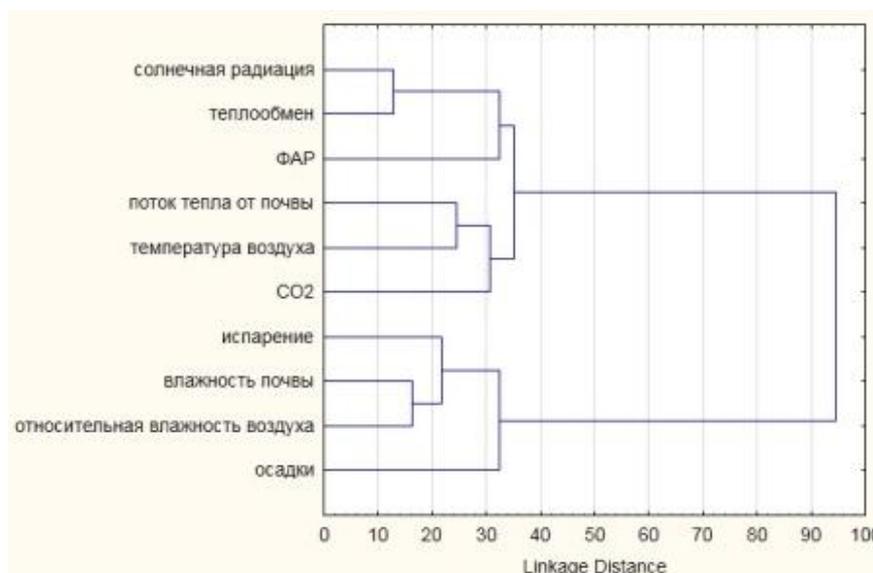


Рисунок 23. Результаты кластерного анализа методом Варда

Согласно результатам регрессионного анализа, чистый экосистемный обмен за сутки в Опыте СамГУ (27) прямо пропорционален среднесуточной температуре воздуха (T_v) и обратно пропорционален количеству осадков (O_c), которые характеризуют 15,7% его дисперсии:

$$X = 0,16 T_v - 0,40 O_c - 1,10 \quad (27)$$

$$(R^2 = 0,16; P < 0,05; N = 583).$$

Аналогичные зависимости потока CO_2 от температуры и осадков используются в большинстве современных климатических и биохимических моделей (Golubyatnikov, Svirezhev, 2008; Jain et al., 2009; Thornton et al., 2007; Wania et al., 2012; Zaehle, Friend, 2010).

Для того чтобы учесть влияние каждой из измеренных переменных на нетто-баланс полупустынных пастбищ, был применен факторный анализ, по результатам которого независимые переменные были разбиты на три фактора (табл. 26). Исходя из значений факторных нагрузок и общностей, первый фактор связан преимущественно с влажностными характеристиками: испарением,

влажностью почвы, относительной влажностью и температурой воздуха. Второй, радиационный, состоит из солнечной радиации, фотосинтетически активной радиации и теплообмена. Третий объединяет поток тепла от почвы и осадки. В сумме выделенные факторы описывают 79% общей дисперсии метеовеличин: по 33%, 26% и 20% соответственно.

Как известно, общности характеризуют долю дисперсии переменных, описываемую каждым фактором. Так, для испарения, теплообмена и солнечной радиации выделенные факторы объясняли более 90% дисперсии, для температуры, относительной влажности воздуха и влажности почвы – более 80%.

Поскольку классический регрессионный анализ не выявил явных влияний погодно-климатических условий на нетто-баланс CO_2 в полупустынях Узбекистана, решено было построить уравнение зависимости потока CO_2 (28) от факторизованных метеопеременных на основе рассчитанных суточных значений каждого из трех факторов (F_{1-3}):

$$X = 2,91 + 0,95 F_1 + 0,65 F_2 + 0,61 F_3 \quad (28)$$

$$(R^2 = 0,13; P < 0,05; N = 583).$$

На рисунке 24 можно заметить, что результаты моделирования чистого экосистемного обмена через стандартные метеопеременные и с помощью рассчитанных факторов принципиально не отличаются друг от друга. Уравнения достаточно точно предсказывают нетто-поток CO_2 , наилучшим образом рассчитывая его величину в среднем диапазоне значений: $-0,20 \dots +0,20 \text{ г м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$.

Как было отмечено выше, модель DNDC рассчитывает с суточным шагом множество составляющих биогеохимического цикла С, а также производные от них, в том числе чистый экосистемный обмен, определяемый как разность между фотосинтезом и дыханием экосистемы (рис. 25). Это позволяет при определении баланса С в почве избежать ошибки, состоящей в двойном учете выделившегося CO_2 – при дыхании корней и как компонента NEE, часто возникающей при совокупных оценках эмиссии CO_2 (Заварзин, Кудеяров, 2006). Благодаря этому DNDC начала использовалась для оценки нетто-баланса CO_2 в естественных (Deng et al., 2014) и антропогенных ландшафтах.

Таблица 26. Результаты факторного анализа метеопеременных в Опыте СамГУ

Переменные	Факторные нагрузки			Общности			
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	R ² _{множеств}
Солнечная радиация	0,03	0,90	0,32	0,00	0,10	0,91	0,98
Фотосинтетически активная радиация	0,18	0,69	-0,03	0,03	0,03	0,50	0,24
Осадки	-0,33	0,00	-0,68	0,11	0,56	0,56	0,39
Испарение	-0,91	-0,01	0,15	0,82	0,85	0,85	0,91
Влажность почвы	-0,90	-0,24	-0,06	0,82	0,82	0,88	0,81
Относительная влажность воздуха	-0,76	-0,28	-0,47	0,58	0,79	0,87	0,82
Поток тепла от почвы	-0,06	0,24	0,91	0,01	0,80	0,86	0,77
Теплообмен	0,44	0,82	0,06	0,20	0,20	0,87	0,98
Температура воздуха	0,63	0,44	0,42	0,39	0,57	0,76	0,81
Собственные значения матрицы	2,97	2,33	1,81				
Доля описываемой фактором дисперсии переменных	0,33	0,26	0,20				

Выделены наиболее значимые ($x > 0,50$) факторные нагрузки и общности

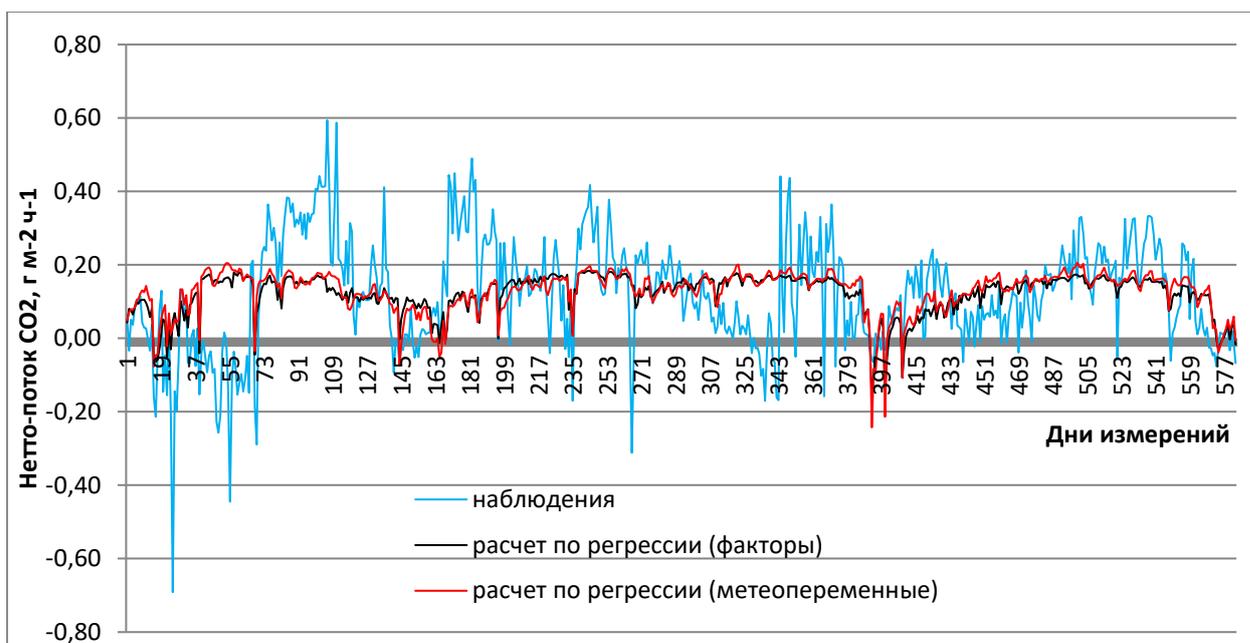


Рисунок 24. Инструментальный и рассчитанный на основе регрессионных уравнений нетто-поток CO_2 в Опыте СамГУ

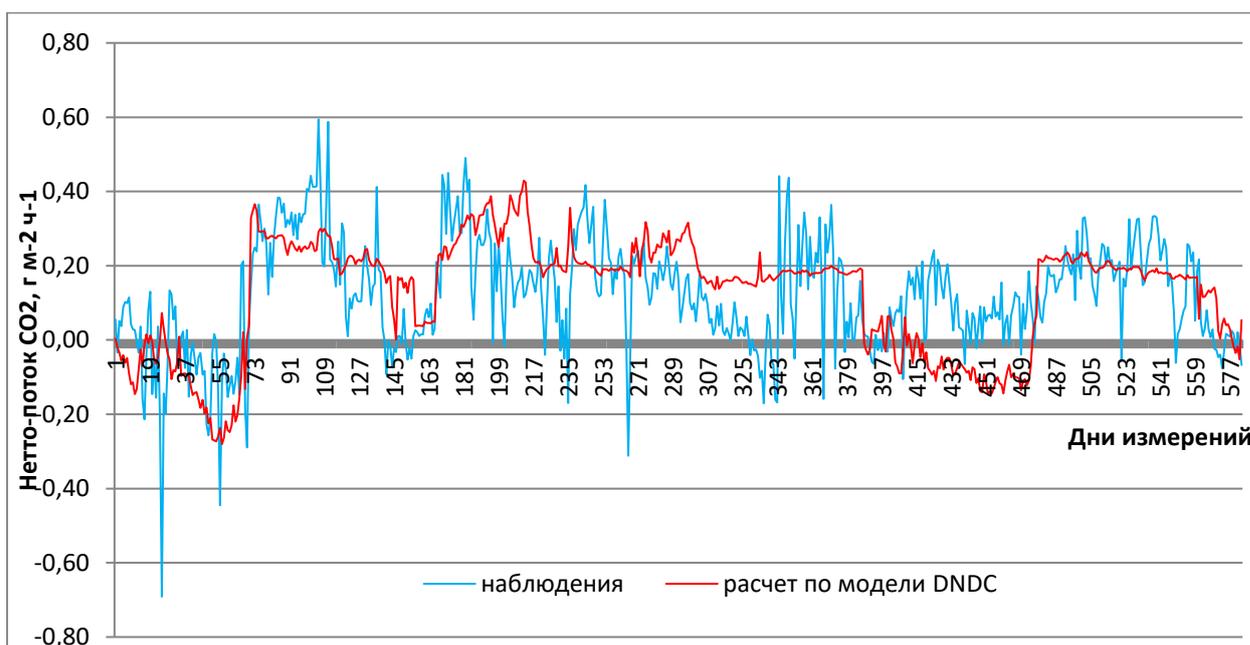


Рисунок 25. Инструментальный и рассчитанный на основе модели DNDC нетто-поток CO_2 в Опыте СамГУ

Результаты оценки эффективности моделирования (табл. 27) позволяют сделать вывод о том, что DNDC по сравнению с регрессией на базе метеорологических и факторизованных переменных позволяет лучше

смоделировать NEE. Коэффициент несоответствия Тэйла для DNDC значительно ниже, чем для регрессионных зависимостей, а корреляции выше. Кроме того, только для имитационной модели двухвыборочный F-тест показал равенство дисперсий расчетных и опытных значений.

Полученные данные хорошо согласуются с оценками зарубежных исследователей, доказавших возможность успешного использования этой модели для оценки баланса CO₂ на пастбищах северо-западной Европы (Abdalla et al., 2013) и Монголии (Kang et al., 2013). Кроме того, рассмотренный пример подтверждает практическую применимость имитационных моделей для оценки влияния внешних факторов на интенсивность фотосинтеза, поскольку эффект такого воздействия сложно оценить количественно, в том числе вследствие сложности создания полевых опытов (Sutton et al., 2013).

Таблица 27. Оценка эффективности моделирования зависимости баланса CO₂ в Опыте СамГУ

Метод моделирования		Регрессия от метеоусловий	Регрессия от факторов	DNDC
Средняя, г С м ⁻² ч ⁻¹	Опыт	0,121 ± 0,148 (N = 583)		
	Модель	0,128 ± 0,058	0,121 ± 0,054	0,128 ± 0,153
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,124	0,134	0,108
	Тэйла	0,418	0,425	0,362
Коэффициенты корреляции	r_p	0,357	0,366	0,554
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Однофакторный дисперсионный анализ	F	0,913	0,000	0,477
	$F_{крит}$	3,849	3,849	3,849
	P	0,340	< 0,001	0,490
Двухвыборочный F-тест для дисперсий	F	7,447	7,447	1,001
	$F_{крит}$	1,146	1,146	1,146
	P	< 0,001	< 0,001	0,493

3.5. Выводы

1. Проведена успешная верификация модели DNDC по материалам литературных источников и данным трех полевых опытов, представляющих собой различные типы агроландшафтов и расположенных в различных по почвенно-климатическим условиям географических зонах, в которых измерялись потоки CO_2 . Тем самым доказана обоснованность применения модели в России для анализа и прогноза компонентов биогеохимического цикла углерода в основной зоне сельскохозяйственного использования земель.

2. Использованный набор из 5 критериев эффективности (коэффициент Нэша-Сатклиффа, коэффициент Тэйла, коэффициент корреляции, однофакторный дисперсионный анализ и F-тест дисперсий) является достаточным для доказательства не только достоверности полученных с помощью DNDC выводов, но и более высокой ее эффективности при воспроизведении потоков CO_2 по сравнению со статистическим моделированием.

3. Выявленным недостатком модели является занижение дыхания корней в летнее время, связанное со встроенной в модель функцией снижения роста растений при высоких температурах воздуха, пересыхании пахотного слоя почвы и недостатке в нем питательных веществ.

4. Посредством корреляционного и регрессионного, а также многомерных методов анализа выявлено преобладающее воздействие антропогенных факторов на динамику потоков CO_2 в агроландшафтах различных географических зон по сравнению с природными. Среди последних отмечено преимущественное влияние температурного режима на формирование дыхания почвы и чистого экосистемного обмена по сравнению с влажностными характеристиками среды.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ПОТОКОВ CO₂ В АГРОЛАНДШАФТАХ НА ОСНОВЕ DNDC

Глава посвящена вычислительным экспериментам на основе разработанной методики применения модели DNDC в условиях России. Проведен анализ воздействия внешних природных и антропогенных факторов на потоки CO₂ в системе «атмосфера – растение – почва». Составлены ретроспектива и прогноз их динамики в пространстве и времени в зависимости от изменений условий географической среды на примере Центрального Нечерноземья.

4.1. Разработка методики применения модели DNDC для оценки потоков CO₂ в агроландшафтах на территории России

Ключевая проблема имитационного моделирования связана с зависимостью его точности от высокого количества и качества входных данных (Estimation of emissions from agriculture, 2004). Мы предлагаем решать ее через большее доверие к использованию официальной статистической информации и данных литературных источников, которые хорошо проявили себя при апробации модели для расчетов потоков углерода в агроценозах. В таблице 28 приведены конкретные, апробированные на конечных результатах, рекомендуемые методики получения и подготовки входных данных для моделирования на основе DNDC в условиях России.

Чтобы модель наиболее точно отражала биогеохимический цикл С, она должна быть модифицирована, или настроена, в соответствие с конкретными условиями местности (Cai et al., 2003). Более того, сами создатели модели отмечают, что для ее корректной работы требуется оптимизация характеристик культур и других входных параметров (Gilhespy et al., 2014).

Таблица 28. Рекомендуемые источники и методы подготовки данных для моделирования биогеохимического цикла углерода на основе DNDC

Блок данных	Источник данных	Методика получения входной информации
Природные факторы		
Климатические условия	ВНИИ гидрометеорологической информации – Международный центр данных, а также созданная база данных агроклиматических условий Центрального Нечерноземья	Пространственное усреднение значений температуры и осадков по региону на основе сетки с разрешением 2,5° широты на 5,0° долготы или усреднение на основе административно-территориального деления
Почвенный покров	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (2014)	Определение преобладающего типа почвы и его характеристик
Антропогенные факторы		
Агротехника сельскохозяйственных культур	Технологические карты, изданные Минсельхозом и профильными научными учреждениями	Прямой перенос данных с желательным уточнением дат и использованных приемов обработки почвы на конкретных участках
Урожайность сельскохозяйственных культур	Федеральная служба государственной статистики	Прямой перенос данных с желательным уточнением продуктивности культур на конкретных участках

Содержание углерода в растительной биомассе	Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов»	Расчет на основе утвержденных коэффициентов
Дозы азотных удобрений	Федеральная служба государственной статистики, Бюллетени «Внесение удобрений под урожай и проведение работ по химической мелиорации земель»	<p>Расчет через отношение общего объема азотных удобрений, внесенных под конкретную культуру в области, и удобренной площади, или путем нахождения через пропорцию доли азотных удобрений от всего объема минеральных:</p> $n_N = \frac{V_N}{S_{\text{мин}}} \approx \frac{V_N * n_{\text{мин}}}{V_{\text{мин}}},$ <p>где n_N – доза азотных удобрений (кг/га), V_N – количество азотных удобрений (тыс. ц), $S_{\text{мин}}$ – площадь, удобренная минеральными удобрениями (тыс. га), $n_{\text{мин}}$ – доза минеральных удобрений (кг/га), $V_{\text{мин}}$ – общее количество минеральных удобрений (тыс. ц)</p>

Чтобы адаптировать DNDC для ее применения в России, нами не только была разработана общая методика сбора, обработки и подготовки данных для их использования в моделировании, но и были уточнены ее внутренние настройки и параметры, принимаемые «по умолчанию»: прежде всего, характеристики почвенного покрова, биологические особенности возделываемых культур.

Среди характеристик почвенного покрова, главным образом, были скорректированы доли фракций органического вещества почвы (гумуса), соотношение C:N в нем и глубина верхнего слоя, в соответствии с тем, какие особенности почвенного покрова характерны для Европейской территории России (табл. 29).

Наиболее значительные изменения коснулись блока сельскохозяйственных культур. Так, для ключевых культур Нечерноземья были уточнены соотношения между фракциями биомассы (зерно : стебли : листья: корни) на основе уравнений, применяемых для оценки пожнивных и корневых остатков в России (Левин, 1977), соотношение C:N в биомассе (табл. 30), а также потребности растений в тепле и влаге (табл. 31).

На основе собранных и систематизированных данных, представленных с технологических картах, были разработаны стандартизированные технологии возделывания озимой пшеницы (табл. 32) и картофеля (табл. 33), которые использовались при оценке чувствительности модели и ее способности моделировать дыхание пахотных почв, а также при восстановлении потоков CO₂ в агроландшафтах Центрального Нечерноземья за 1990-2017 гг.

Таблица 29. Корректировка параметров почвенного покрова, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Показатель	В модели по умолчанию	Исправленное для России	Ссылка
Фракция легкорастворимого гумуса	0,0138	Серые лесные – 0,335, выщелоченные черноземы – 0,30	Ларионова и др., 2011; Люри и др., 2010
Фракция труднорастворимого гумуса	0,9762	Серые лесные – 0,655, выщелоченные черноземы – 0,45	
Соотношение C:N в C _{орг}	10	Дерново-подзолистые иллювиально-железистые – 9, серые лесные – 12	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014
Глубина верхнего слоя почвы, см	20	Дерново-подзолистые преимущественно неглубокоподзолистые – 17, дерново-подзолистые преимущественно мелко и неглубокоподзолистые – 21, серые лесные – 25, выщелоченные черноземы – 29	

Таблица 30. Корректировка соотношения фракций биомассы сельскохозяйственных культур, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Культура	Критерии	Параметры	Зерно	Стебли	Листья	Корни	Ссылка
Озимая пшеница	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,41	0,21	0,21	0,17	Рассчитанное для России – Левин, 1977; Исправленное для России – Назаренко и др., 2011; Новиков, Кисаров, 2012
		Рассчитанное для России	0,22	0,26	0,26	0,26	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	40	95	95	95	
		Исправленное для России	-	80	80	52	
Ячмень	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,30	0,23	0,23	0,23	
		Рассчитанное для России	0,26	0,22	0,23	0,29	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	45	75	75	85	
		Исправленное для России	-	80	80	59,5	
Овес	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,23	0,27	0,27	0,23	
		Рассчитанное для России	0,25	0,24	0,24	0,27	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	35	75	75	85	
		Исправленное для России	-	80	80	59,5	
Озимая рожь	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,28	0,23	0,23	0,25	
		Рассчитанное для России	0,21	0,27	0,27	0,25	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	20	50	50	50	
		Исправленное для России	-	85	85	-	
Картофель	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,70	0,13	0,13	0,05	
		Рассчитанное для России	0,78	0,06	0,07	0,09	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	60	60	60	60	
		Исправленное для России	-	-	-	25	

Таблица 31. Корректировка требований сельскохозяйственных культур к внешним условиям, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Культура	В модели по умолчанию		Исправленное для России (по данным Посыпанов и др., 2007; Шевченко, 2002)	
	Потребность в тепле, °С	Коэффициент водопотребления	Потребность в тепле, °С	Коэффициент водопотребления
Озимая пшеница	1300	200	2000 (1850-2200)	380 (340-420)
Озимая рожь	2000	250	3150 (3000-3300)	345 (270-420)
Ячмень	1300	250	1250 (1000-1500)	375 (300-450)
Овес	1650	250	1250 (1000-1500)	475 (470-480)
Картофель	2100	415	1300 (1000-1600)	625 (600-650)
Подсолнечник	1500	495	2300 (2200-2400)	485 (400-570)

Таблица 32. Адаптированная для целей моделирования технология возделывания озимой пшеницы (по материалам Грачев, 1980; Зинченко и др., 2012; Карпов, 2000; Коледа и др., 2010; Типовые технологические карты, 1984)

Технологический прием	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Количество удобрений
Лушение стерни	I декада августа	6-8	
Внесение органических удобрений	Через 1 день		100%
Пахота с боронованием и внесением минеральных удобрений	Через 1 день	20-22	50%
Предпосевная культивация	Через 3 дня	12-14	
Посев с внесением минеральных удобрений	II декада августа (на севере раньше, на юге позже)		30%
Весеннее боронование	I декада апреля		
Внесение минеральных удобрений	Через 1 день		20%
Уборка	III декада августа (на юге раньше, на севере позже)		

Следует иметь в виду, что даты проведения агротехнических мероприятий в реальности будут зависеть от погодных условий конкретного года и особенностей возделываемых сортов, а в данном исследовании являются условными и служат исключительно для целей проверки модели. Временной подход, используемый в таблицах, позволяет смещать даты проведения почвообрабатывающих мероприятий, в частности посева / посадки и относительно них – других технологических приемов, в зависимости от климатических условий рассматриваемого региона. Количество вносимых удобрений, выраженное в относительных величинах по различным срокам внесения, позволяет учесть его ежегодные изменения.

Таблица 33. Адаптированная для целей моделирования технология возделывания картофеля (по материалам Грачев, 1980; Евстропов, 2011; Коледа и др., 2010)

Технологический прием	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Количество удобрений
Лущение стерни	III декада июля	6-8	
Внесение органических удобрений и вспашка	III декада августа	20-22	100%
Внесение минеральных удобрений	Через 7-10 дней		55%
Ранневесеннее боронование	II декада апреля		
Ранневесенняя культивация	Через 5 дней	5-6	
Перепашка зяби	Через 5 дней	20-22	
Культивация и нарезка гребней с внесением минеральных удобрений	Через 5 дней	12-14	45%
Посадка	I декада мая (на юге раньше, на севере позже)		
Первое довсходовое рыхление	Через 5 дней	5-6	
Второе довсходовое рыхление	Через 5 дней	5-6	
Послевсходовое рыхление междурядий	I декада июня	12-14	
Окучивание	I декада июля		
Предуборочное рыхление	III декада августа	12-14	
Уборка	I декада сентября (на севере раньше, на юге позже)		

4.2. Использование моделирования для анализа влияния внешних факторов на потоки CO_2 в агроландшафтах

Оценка влияния природных факторов. Модели позволяют заменить реальный объект, посредством чего можно выяснить такие закономерности его функционирования, которые в полевых условиях идентифицировать было бы невозможно. По результатам работы с DNDC в условиях Центрального Нечерноземья, проведенной в рамках настоящего исследования, было отмечено, что наиболее существенными факторами, определяющими особенности биогеохимического цикла С в пахотных почвах Европейской части России, являются вносимые удобрения (для всех выходных параметров), доля содержания глинистых частиц в почве и погодные условия (для определения ежегодного прироста / убыли содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве), а также биологические и технологические особенности культур (для эмиссии CO_2).

Аналогичные факторы были отмечены другими исследователями при работе с моделью. Первоначальная проверка чувствительности DNDC проводилась ее автором на посевах кукурузы в США (Li et al., 1994). Было отмечено, что на содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве наибольшее влияние оказывают органические удобрения, снижение интенсивности обработки почвы, увеличение содержания азота в минеральных удобрениях, при этом результаты моделирования чувствительны к гранулометрическому почве, начальному содержанию в ней С и годовому количеству осадков. При оценке изменения содержания почвенного С и направленности нетто-потоков парниковых газов на посевах риса и озимой пшеницы в Китае и кукурузы в США выходные данные модели Crop-DNDC в наибольшей степени реагировали на изменения климатических условий, концентрации CO_2 в атмосфере и агротехнических приемов (Zhang et al., 2002).

Изменение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$, т.е. его накопление в почве или потеря за календарный год, непосредственно проявляется через вариации интенсивности эмиссии CO_2 . В результате анализа были отмечены высокая отзывчивость динамики $\text{C}_{\text{орг}}$ на изменение погодных условий (температуры Т и осадков Р,

являющихся входными параметрами модели) и существенные колебания его запаса в зависимости от гранулометрического состава почвы. График зависимости представлен на рисунке 26 и имеет вид синусоиды с пиком (наибольшим накоплением / наименьшими потерями) при 19-40% глины. При этом, если в теплом засушливом 2011 г. ($T_{\text{среднегод}} = 6,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{год}} = 570,1 \text{ мм}$) преимущественно шло накопление С в почве, то в прохладном влажном 2012 г. ($T_{\text{среднегод}} = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{год}} = 818,3 \text{ мм}$) содержание этого элемента убывало. Отмечена также прямая зависимость ежегодных эмиссионных потерь С от исходного содержания $C_{\text{орг}}$ в почве (рис. 27).

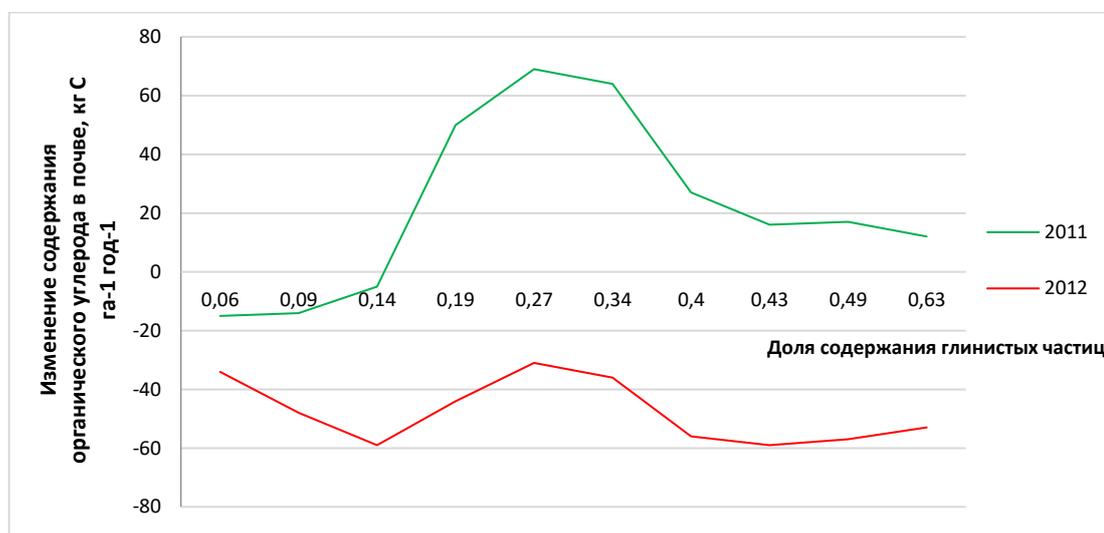


Рисунок 26. Влияние погодных условий и гранулометрического состава почвы на динамику почвенного $C_{\text{орг}}$ по данным модели DNDC

Гранулометрический состав почвы, или доля содержания глинистых частиц, характеризует не только ее агрегатное состояние, но и условия протекания химических реакций, в том числе – количество активных каталитических центров на единицу объема, отвечающих за образование того или иного продукта реакции, поскольку трансформация органических и неорганических веществ в почве носит ферментативный характер и изменяется под влиянием особенностей ее влажностного и аэрационного режима, а также агроэкологических факторов. Наблюдаемую зависимость динамики накопления С от метеоусловий можно

объяснить изменением активности почвенной микробиоты и скорости биохимических процессов в ответ на отклонение температуры и влажности во внешней среде от оптимальных (Алексеева, Фомина, 2015).

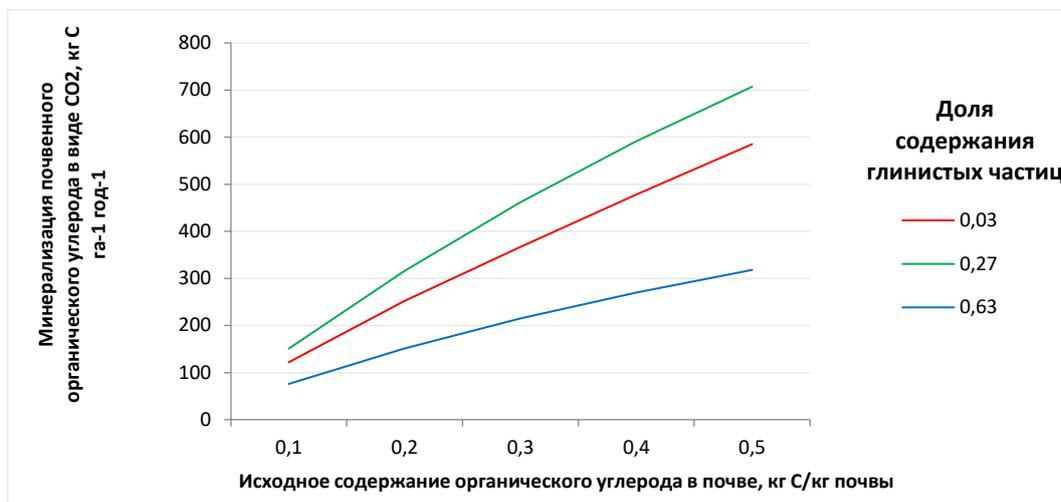


Рисунок 27. Зависимость интенсивности эмиссии CO_2 из парующей почвы от ее гранулометрического состава и содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ по данным модели DNDC

Оптимальная температура для активности микроорганизмов находится в диапазоне 35-45°C. Но в агроландшафтах такие экстремальные температуры обычно приходятся на период недостатка влаги, вследствие чего они не влияют на скорость разложения органического вещества. В итоге получается, что используемые функции, описывающие влияние температур в широком их диапазоне (такие, как уравнения Вант-Гоффа и Аррениуса) систематически недооценивают скорость разложения при низких температурах и переоценивают ее при высоких. Кроме того, температура и влажность зависят от особенностей субстрата, и, соответственно, чем легче разлагается органическое вещество, тем более чувствительна скорость этого процесса к гидротермическим условиям (Kirschbaum, Mueller, 2001).

Эмиссия CO_2 из почвы показала наибольшую чувствительность к биотическим факторам модели – биологическим особенностям сельскохозяйственных культур (рис. 28). По данным моделирования, для условий Московской области при различных технологиях возделывания пропашные

культуры способствуют выбросу в атмосферу максимального количества CO_2 (значения которого в среднем составляют $1847,0 \pm 1062,2 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), тогда как эмиссия с участков, занятых бобовыми более чем в 7 раз ниже ($373,1 \pm 76,5 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$). Зерновые и технические культуры занимают промежуточное положение. Немаловажную роль при этом играет число почвообрабатывающих мероприятий, наибольшее именно у пропашных, а также количество оставляемых культурами корневых и пожнивных растительных остатков.

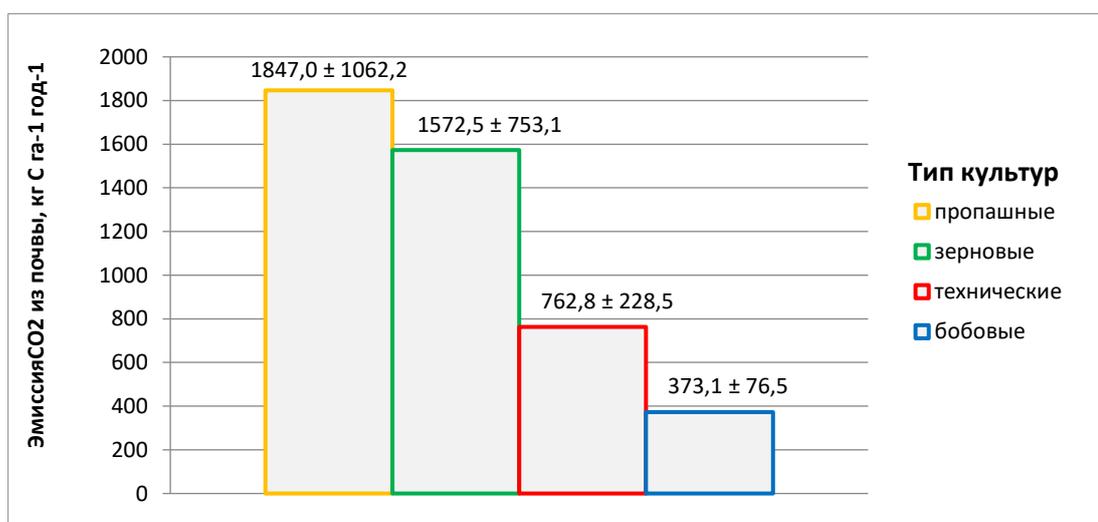


Рисунок 28. Зависимость интенсивности эмиссии CO_2 от биологических особенностей возделываемых культур по данным модели DNDC

Полученные модельные данные косвенно согласуются с тем, что тип растительности имеет более значимое влияние на формирование годовой эмиссии CO_2 из почв по сравнению с погодными условиями (Курганова и др., 2011). В монографии (Косолапов и др., 2015) подтверждается, что полевые культуры существенно различаются по влиянию на процессы минерализации гумуса: наибольшие его среднегодовые потери наблюдаются под чистым паром и пропашными, средние – под зерновыми и однолетними травами; а под многолетними травами сокращения запасов не происходит или отмечается их увеличение. Относительно низкие значения эмиссии CO_2 из агроценозов озимых зерновых и бобовых растений сочетаются с результатами, полученными в работе (Хохлов, 1980), согласно которым культуры, оставляющие большое количество

корневых и пожнивных остатков, – зерновые, многолетние и однолетние травы – стабилизируют баланс С и способствуют сохранению уровня его содержания в почве, в отличие от пропашных.

В то же время индивидуальные требования сельскохозяйственных культур к условиям окружающей среды не оказывали значимого влияния на результаты моделирования, поскольку все они адаптированы к произрастанию в одном климатическом поясе и, вследствие сходства физиологических особенностей, предъявляют сходные требования к теплу и влаге. При сравнении потребностей культур с тепло- и влагообеспеченностью региона, определенными по ранее созданной нами базе данных, можно сделать вывод о том, что складывающиеся в Центральном Нечерноземье агроклиматические условия чаще всего полностью удовлетворяют потребности культур, в полной мере обеспечивая развитие растений и формирование урожая, особенно на фоне современного потепления климата.

Оценка влияния антропогенных факторов. Оценка влияния особенностей сельскохозяйственного производства на компоненты биогеохимического цикла С с помощью модели DNDC проводилась на основе последовательного введения переменных по вариантам (рис. 16), характеризующим усиление антропогенного воздействия на агроландшафт: от чистого пара через посеы без удобрений к интенсивным технологиям с повышенными их дозами. При этом оценивались изменения таких результирующих параметров как содержание органического углерода в почве, эмиссия CO₂ и совокупный поток парниковых газов.

Как видно на рисунке 29, параметры моделируемого цикла С изменяются пропорционально интенсивности ведения сельскохозяйственного производства, а наибольший их отклик наблюдается при использовании удобрений, особенно органических. При этом динамика содержания С_{орг} в почве меняется с потери на накопление, а направление общего нетто-потока парниковых газов, выраженных через CO₂-эквивалент, меняется с эмиссии в атмосферу на поглощение в почве. Ключевая роль системы удобрений и севооборота в накоплении С в почве, в частности его активной фракции, подтверждается в работе (Романенков, 2010).

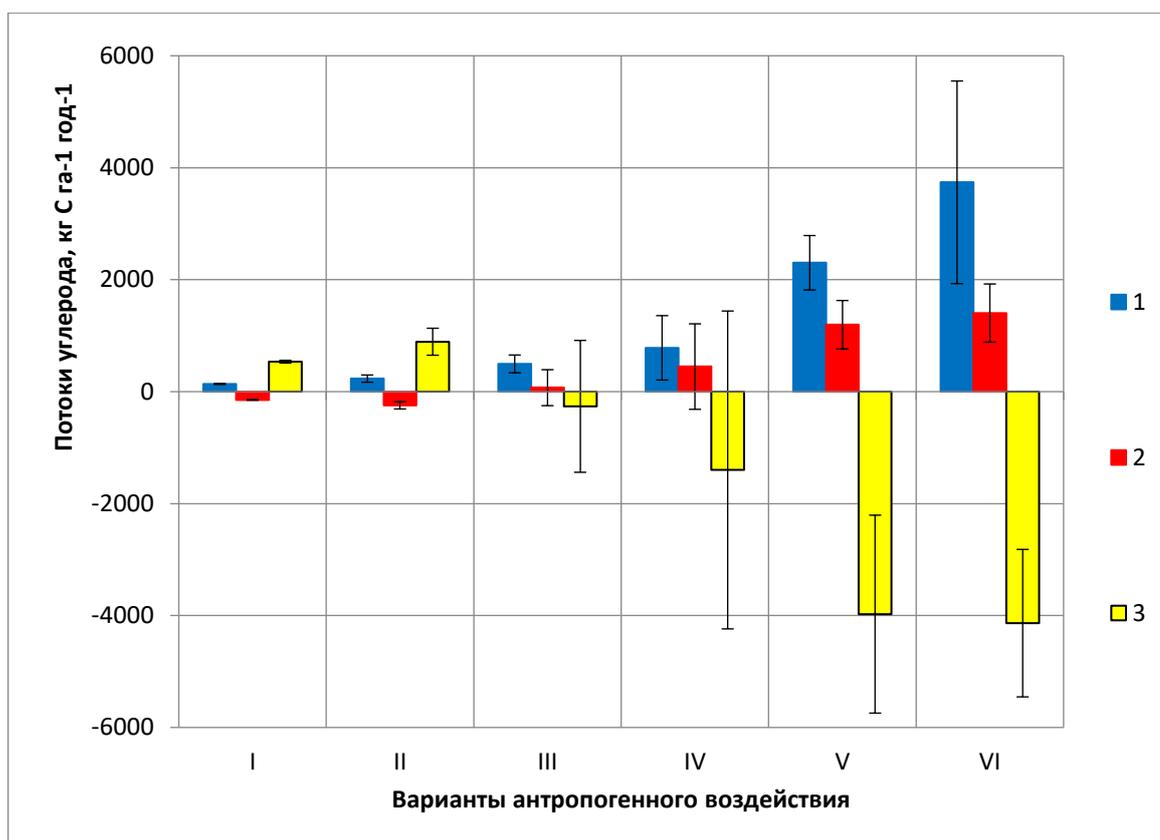


Рисунок 29. Влияние антропогенных факторов на компоненты биогеохимического цикла углерода по данным модели DNDC

1 – эмиссия CO_2 из почвы за год, $\text{кг га}^{-1} \text{год}^{-1}$

2 – изменение содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве за год (положительные значения – накопление, отрицательные – потеря), $\text{кг га}^{-1} \text{год}^{-1}$

3 – совокупный потенциал парниковых газов в пересчете на CO_2 -эквивалент за год (положительные значения – эмиссия, отрицательные – депонирование).

Варианты антропогенного воздействия:

I – чистый пар (учитываются только метеорологические условия и почвенные характеристики, без антропогенного воздействия);

II – чистый пар с обработкой почвы;

III – озимая пшеница и картофель;

IV – озимая пшеница и картофель с внесением минеральных удобрений;

V – озимая пшеница и картофель с внесением минеральных и органических удобрений,

VI – озимая пшеница и картофель с внесением двойных доз минеральных и органических удобрений

В почве, оставленной под паром, содержание $C_{\text{орг}}$ будет постепенно убывать, прежде всего, за счет эмиссии CO_2 в результате минерализации почвенного органического вещества. Обработка почвы способствует перемешиванию слоев, усилению ее биологической активности, разложению растительных остатков, что может привести к истощению пула почвенного С (Kirschbaum, Mueller, 2001).

При возделывании культур почвенное дыхание усиливается, но часть С возвращается в почву в виде растительных остатков. При внесении минеральных и органических удобрений примерно в 3 и 22 раза увеличивается эмиссия CO_2 , и одновременно возрастает годовой прирост запаса $C_{\text{орг}}$ по сравнению с необработанной почвой (табл. 34). Существенное (в 25-30 раз) увеличение эмиссии CO_2 при внесении органических удобрений объясняется как усилением дыхания корней растений, так и активизацией деятельности почвенной микрофлоры.

Значения совокупного нетто-потока парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в пересчете на CO_2 -эквивалент в рассматриваемом условном севообороте положительны на парующей почве и при возделывании картофеля, т.е. происходит их эмиссия в атмосферу, и отрицательны при возделывании озимой пшеницы, а также использовании в севообороте удобрений, т.е. наблюдается их депонирование в почве. В последнем случае поглощение проявляется, прежде всего, в увеличении содержания $C_{\text{орг}}$ пропорционально количеству С, поступающему в почву с растительными остатками и вносимыми удобрениям. Этот пример также показывает, что в различных вариантах моделирования пропорции эмиссии и поглощения парниковых газов для картофеля и озимой пшеницы совпадают.

CO_2 является наиболее существенным компонентом цикла С, другие крупные потоки связаны с возделываемыми культурами и представлены его поступлением с надземной и подземной биомассой и корневыми выделениями (рис. 30). Незначительная часть баланса приходится на поток метана (на рисунке не показан, т.к. его значения очень малы). Согласно результатам моделирования, в агроландшафтах Нечерноземья CH_4 , в основном, поглощается почвой в малых количествах со средней скоростью $0,1 \pm 0,0 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, независимо от варианта моделирования. В статье (Чистотин и др., 2012) приведены результаты полевых

наблюдений, подтверждающие факт поглощения этого газа парующей легкосуглинистой дерново-подзолистой почвой, численные значения которого увеличивались пропорционально росту плодородия почвы и параллельно увеличению эмиссии CO_2 .

Таблица 34. Пропорциональность потоков углерода в пахотных почвах Московской области под культурами по отношению к парующей почве (без антропогенного воздействия) при различных вариантах моделирования

Значение на парующей почве	Варианты	II	III	IV	V	VI
	Культуры					
Эмиссия CO_2 из почвы						
1	Пшеница	1,2	3,7	2,4	22,0	35,6
	Картофель	1,6	2,9	3,2	20,7	33,5
Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ (положительные значения – накопление в почве, отрицательные – потеря из почвы)						
-1	Пшеница	0,1	0,6	6,0	24,4	28,5
	Картофель	-0,4	-0,6	-0,5	19,8	23,2
Нетто-поток парниковых газов (положительные величины – эмиссия из почвы, отрицательные – поглощение в почве)						
1	Пшеница	-0,1	-0,6	-4,8	-19,8	-20,6
	Картофель	0,4	0,6	0,8	-16,6	-17,3

4.3. Моделирование изменения потоков CO_2 в системе «атмосфера – растение – почва»

В условиях повышения концентрации парниковых газов в атмосфере важно выяснить, как это повлияет на сложившиеся потоки CO_2 в агроландшафтах. Поскольку полевые измерения не несут предсказательную функцию, решить этот вопрос можно только с помощью моделирования.

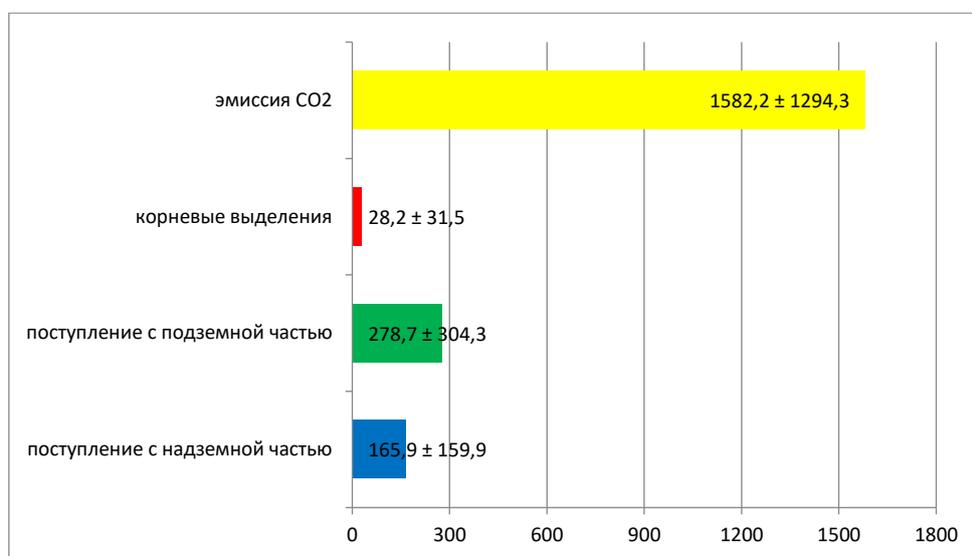


Рисунок 30. Соотношение составляющих баланса С в пахотных почвах Московской области, кг га⁻¹ год⁻¹

В качестве примеров были взяты полевые опыты, расположенные на Европейской территории России, на базе которых проводилась верификация DNDC и для которых уже были восстановлены все характеристики агроландшафтов, требуемые для введения в модель, – Курская биосферная станция ИГ РАН и Полевая опытная станция ИФХиБПП РАН.

Согласно прогнозу на основе DNDC, для агроландшафтов КБС в ближайшие 25 лет дыхание почвы (рис. 31) под всеми четырьмя возделываемыми культурами – озимой пшеницей, ячменем, подсолнечником и картофелем – будет постепенно увеличиваться, как и абсолютные значения нетто-баланса CO₂ (рис. 32).

Исходя из значений чистого экосистемного обмена, в течение вегетационного периода агроландшафты выступают как поглотители CO₂ из атмосферы: интенсивность фотосинтеза (рис. 33) превышает интенсивность дыхания экосистемы, состоящего из надземного и корневого дыхания растений и дыхания почвенных микроорганизмов. Но осенью растительная биомасса отчуждается с поля, тем самым не пополняя запас органического вещества, вследствие чего на современном этапе пул С_{орг} в почве агроландшафтов убывает (рис. 34), кроме участков возделывания озимой пшеницы, которая за счет биологических особенностей и длительного периода вегетации оставляет

значительное число пожнивных и корневых остатков.

При повышении атмосферной концентрации CO_2 и учете ее стимулирующего влияния на фотосинтез и рост биомассы культур, в том числе подземной, модель DNDC прогнозирует достижение нулевого баланса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве через 15-20 лет для картофеля, подсолнечника и ячменя.

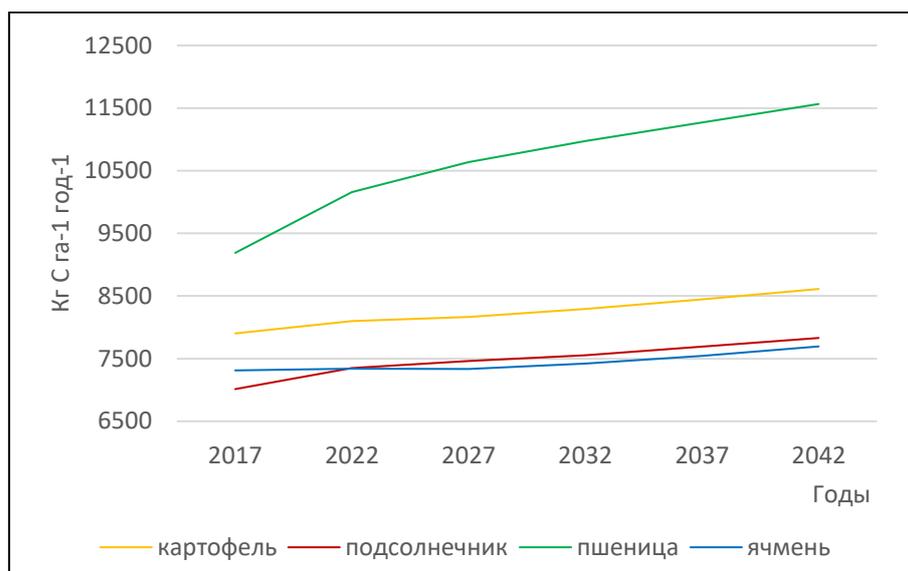


Рисунок 31. Прогноз дыхания почвы в Опыте КБС

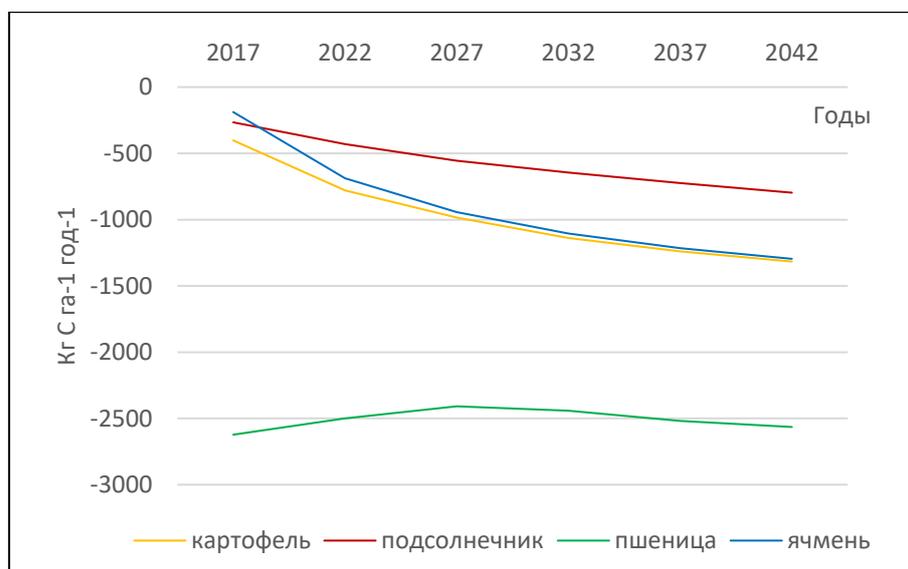


Рисунок 32. Прогноз чистого экосистемного обмена в Опыте КБС

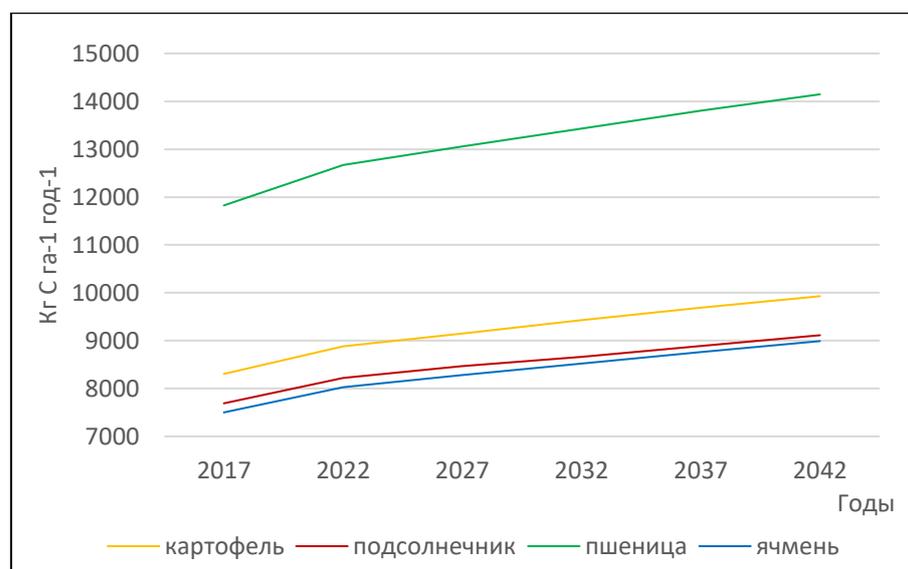
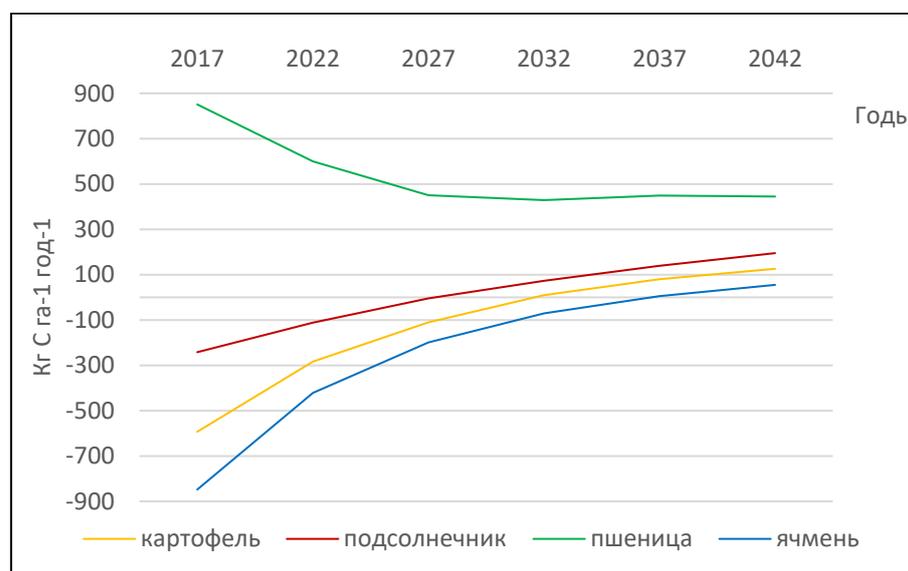


Рисунок 33. Прогноз фотосинтеза в Опытте КБС

Рисунок 34. Прогноз динамики $S_{орг}$ в почве в Опытте КБС

Для зернопарового севооборота Полевой станции ИФХиБПП РАН DNDC позволяет восстановить динамику потоков CO_2 в течение периода проведения опыта (1998-2009 гг.). На рисунке 35 четко заметны изменения их направления в годы возделывания озимой пшеницы и годы парования – 2002, 2004 и 2007 гг., когда наблюдаются положительный нетто-баланс CO_2 (эмиссия его в атмосферу) и потери $S_{орг}$ из почвы.



Рисунок 35. Ретроспектива потоков CO_2 в Опыте ИФХиБПП РАН

Аналогично был дан прогноз изменения потоков CO_2 в этом севообороте на 25 лет в ответ на повышение его атмосферной концентрации при условии чередования паровых полей и периодов возделывания озимой пшеницы. Отмечается восходящая динамика фотосинтеза и дыхания почвы, тогда как абсолютные значения чистого экосистемного обмена будут убывать (хотя в течение вегетационного периода эта экосистема по-прежнему будет оставаться поглотителем атмосферного CO_2), кроме того, будет уменьшаться содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве (рис. 36). Основная причина этого – отсутствие внесения удобрений в Опыте, что является одним из его исходных условий, а также введение чистых паров, при которых не происходит восполнения пула почвенного С за счет поступления растительных остатков. Однако, как и для Опыта КБС, модель прогнозирует стабилизацию баланса $\text{C}_{\text{орг}}$ через 15-20 лет за счет совпадения динамики поглощения и эмиссии CO_2 в системе «почва – растение – атмосфера».

Соотношение между дыханием растений и фотосинтезом для озимой пшеницы составляет 0,35-0,60 (Gifford, 1995). По данным моделирования на основе DNDC, оно составляет 0,36 для Курской биосферной станции ИГ РАН и 0,34 для Полевой опытной станции ИФХиБПП РАН. Заниженное значение в Московской области, вероятнее всего, связано с отсутствием внесения в Опыте удобрений.

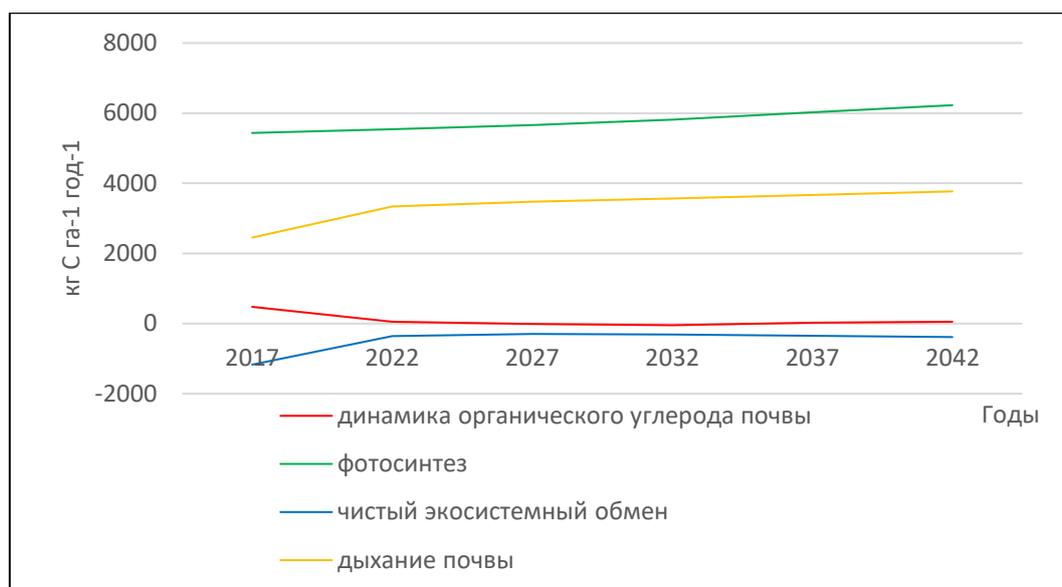


Рисунок 36. Прогноз динамики потоков CO_2 в Опыте ИФХиБПП РАН

4.4. Анализ потоков CO_2 в агроландшафтах Центрального Нечерноземья в пространстве и времени

По результатам предварительного анализа было отмечено, что преобладающими типами почвы в Центральном Нечерноземье (рис. 37) являются дерново-подзолистые преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые, а также дерново-подзолистые преимущественно мелкоподзолистые. Основные их характеристики представлены в таблице 16. Эти типы почвы занимают более 30% территории в Калужской, Костромской, Московской, Смоленской, Тверской и Ярославской областях, входящих в схему моделирования. Другие области Центрального Нечерноземья не были включены в анализ, поскольку для них или невозможно было выделить преобладающий тип почвы из-за пестроты почвенного покрова (Брянская, Рязанская, Тульская), или отсутствовали открытые метеорологические данные (Владимирская, Ивановская, Орловская).

Ключевыми культурами, которые возделываются в каждой из рассматриваемых областей, являются яровые зерновые – ячмень и овес, а также картофель, кроме того, в южной части региона представлены озимые культуры – пшеница и рожь (рис. 38). Наиболее стабильная структура посевных площадей

(СПП) отмечается в Калужской, Московской и Ярославской областях, где на протяжении 28 лет преобладающие в севооборотах культуры не изменялись, в отличие от других областей, в которых за этот период набор культур, занимающих наибольшие площади, варьировал.



Рисунок 37. Территория Центрального Нечерноземья, для которой проводились модельные эксперименты по анализу потоков CO_2 в агроландшафтах

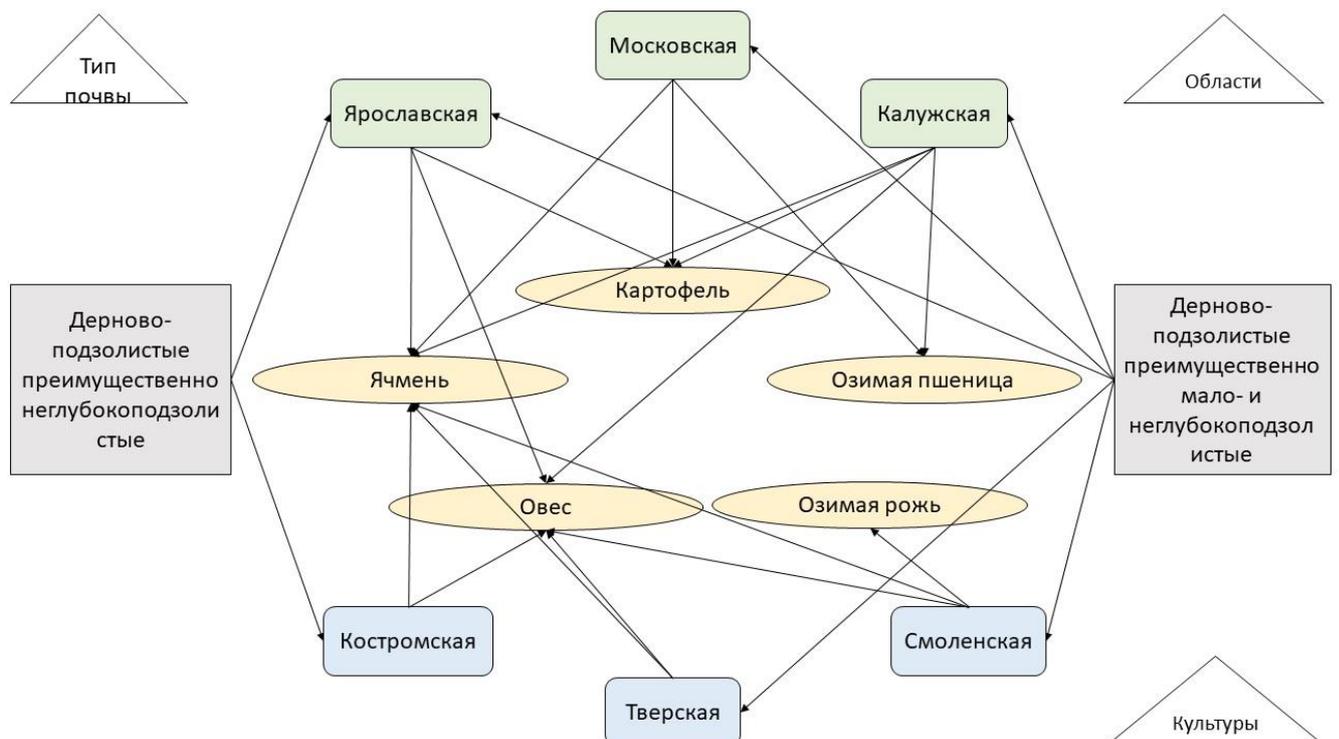
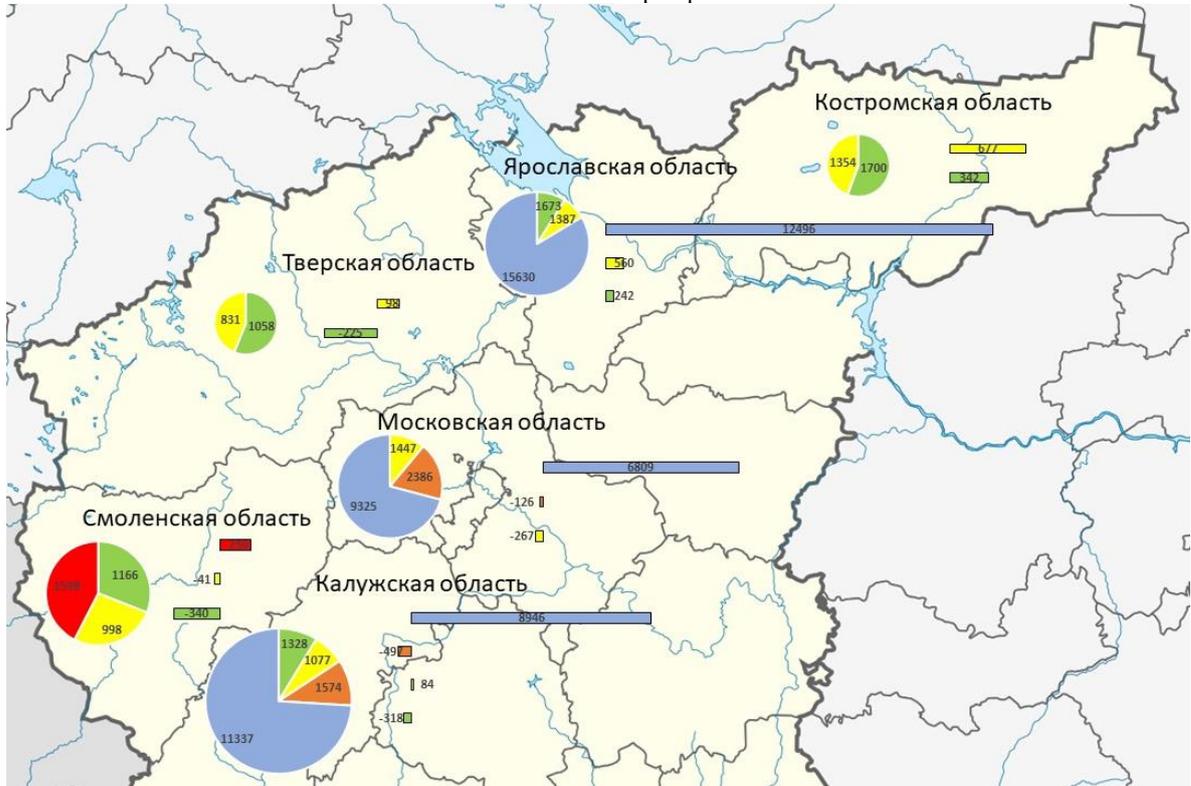


Рисунок 38. Схема моделирования потоков CO_2 в Центральном Нечерноземье

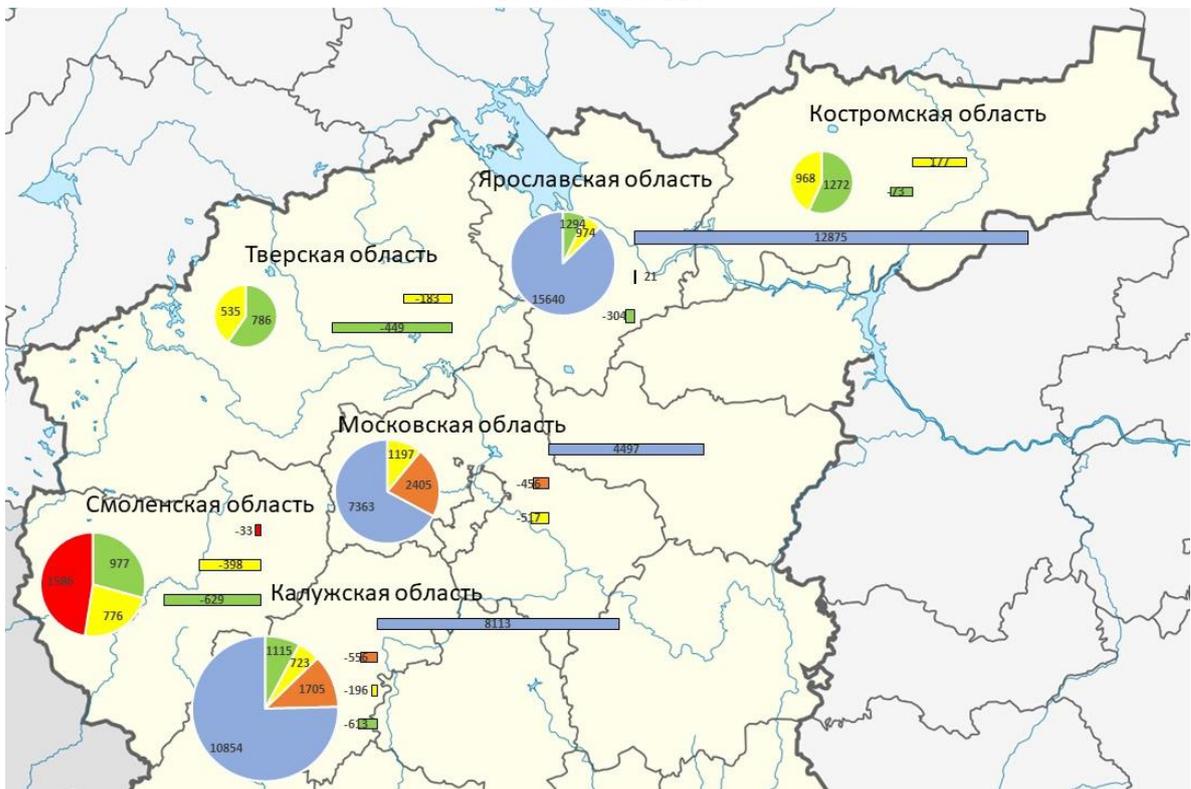
Представленная схема моделирования требует нескольких уточнений в связи с недостатком официальной информации и возникающими на этой основе затруднениями:

- Осредненный на основе административно-территориального деления характер официальных статистических данных,
- Границы почвенных районов не совпадают с границами административных субъектов,
- Неизвестно, на каких конкретно типах почвы расположены пахотные земли,
- Неизвестно, на каких конкретно участках и почвах возделываются определенные культуры,
- Неизвестны севообороты, т.е. последовательности смены культур, и доля времени, которое каждая культура занимает в них,
- Неизвестны сорта выращиваемых культур и требования каждого из них к условиям окружающей среды,
- Площади пахотных земель в целом и площади возделывания отдельных культур постоянно изменяются.

Были рассмотрены динамика двух ключевых потоков CO_2 в агроландшафтах Центрального Нечерноземья – дыхания почвы и чистого экосистемного обмена (рис. 39), а также почвенного органического углерода. С учетом различных типов почвы в регионе и разного набора культур, выращиваемых в каждой области, в анализе участвовало 20 комбинаций агроландшафтов. Продолжительность периода, в течение которого анализировалось их функционирование составляет 28 лет, на протяжении которых менялась урожайность культур и количество вносимых удобрений, что в сумме составляет 560 машинных экспериментов. В рамках каждого из них учитывались 7 параметров: начальное содержание $C_{\text{орг}}$, конечное содержание $C_{\text{орг}}$, микробное дыхание, дыхание корней, фотосинтез, чистая первичная продукция и чистый экосистемный обмен. Таким образом, при создании карт было использовано 3920 численных значений компонентов биогеохимического цикла C .

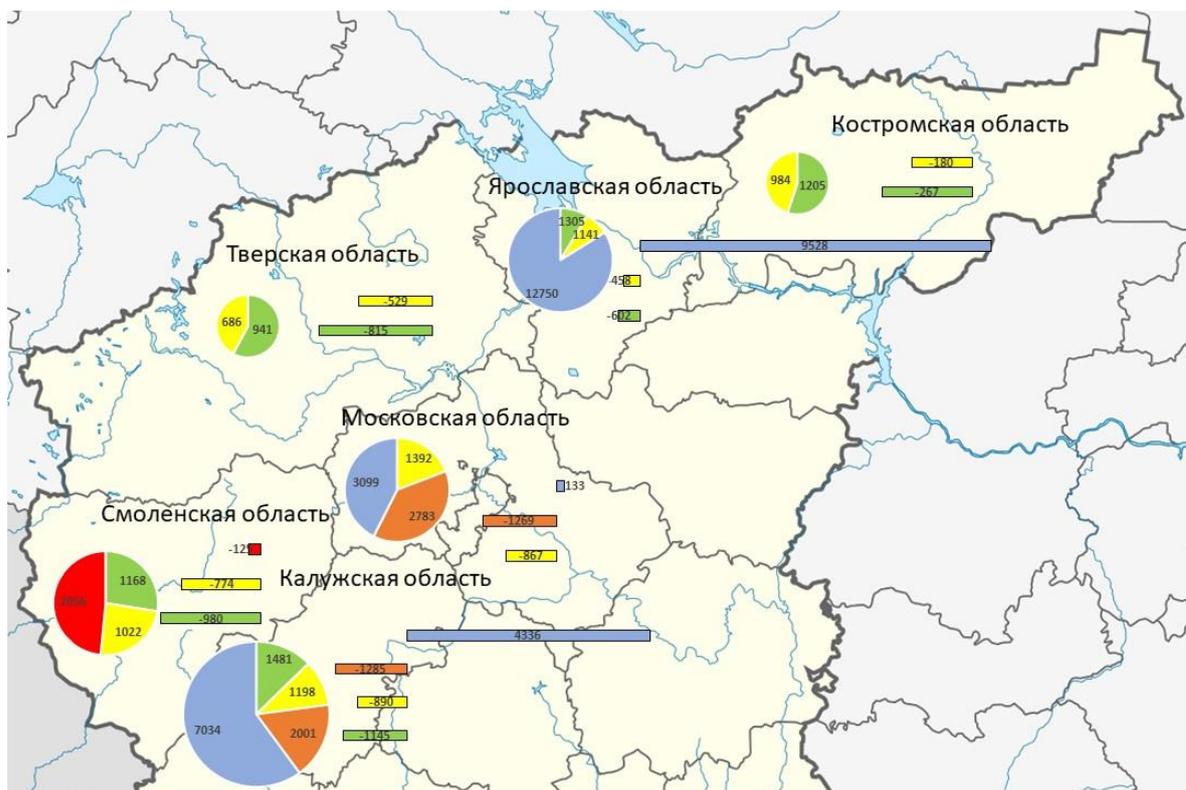


1990-1996 гг.

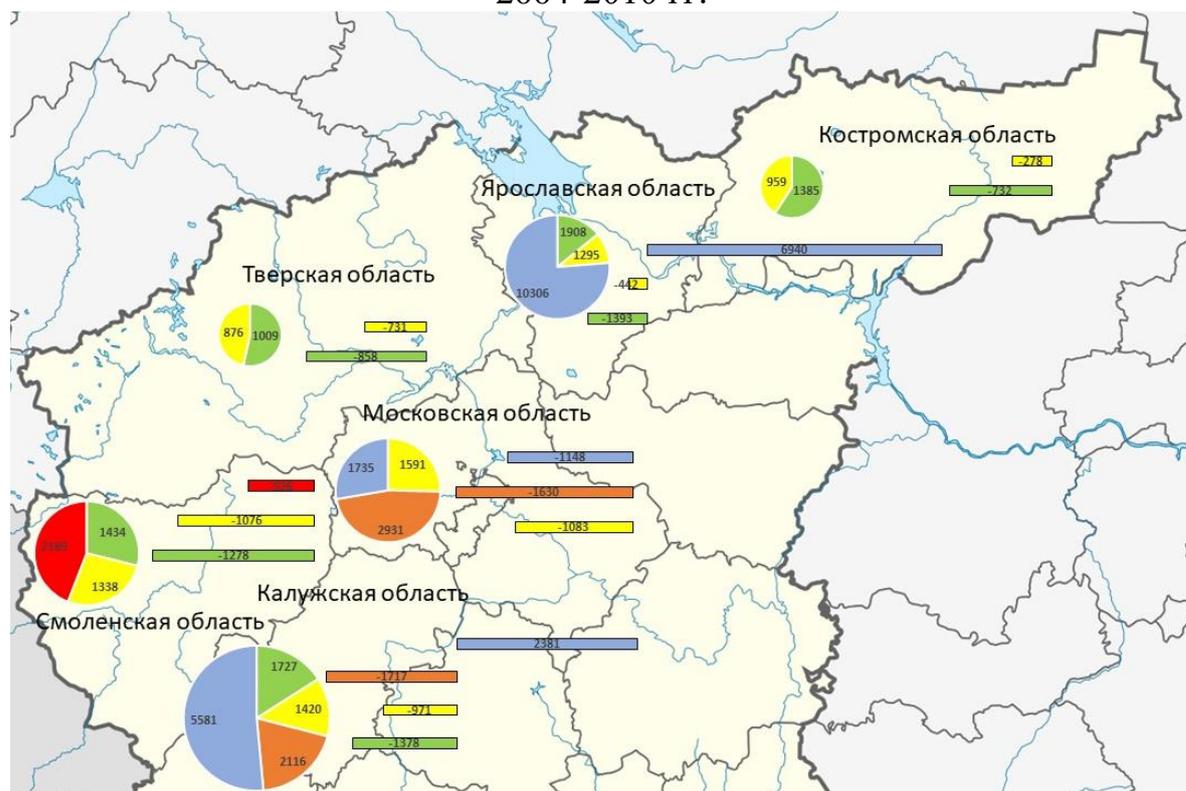


1997-2003 гг.

Рисунок 39 (начало)



2004-2010 гг.



2011-2017 гг.

Рисунок 39 (окончание). Пространственно-временная динамика потоков CO₂ в агроландшафтах Центрального Нечерноземья с разделением по культурам и областям, кг С га⁻¹ год⁻¹

Наибольшие значения дыхания почвы (рис. 40) и накопления в ней $S_{орг}$ наблюдаются в начале 90-х гг. в Калужской, Московской и Ярославской областях. Это объясняется, прежде всего, большими дозами удобрений, вносимых под картофель (40-80 кг/га азотных минеральных и 30-60 т/га органических) и озимую пшеницу (40-120 кг/га азотных минеральных и 2-14 т/га органических). В дальнейшем количественные значения этого показателя стремительно уменьшаются, что вызвано снижением количества используемых органических удобрений. В Костромской, Смоленской и Тверской областях наблюдается тенденция к снижению интенсивности почвенного дыхания в 1990-е гг. и дальнейшее ее усиление в 2010-е гг.

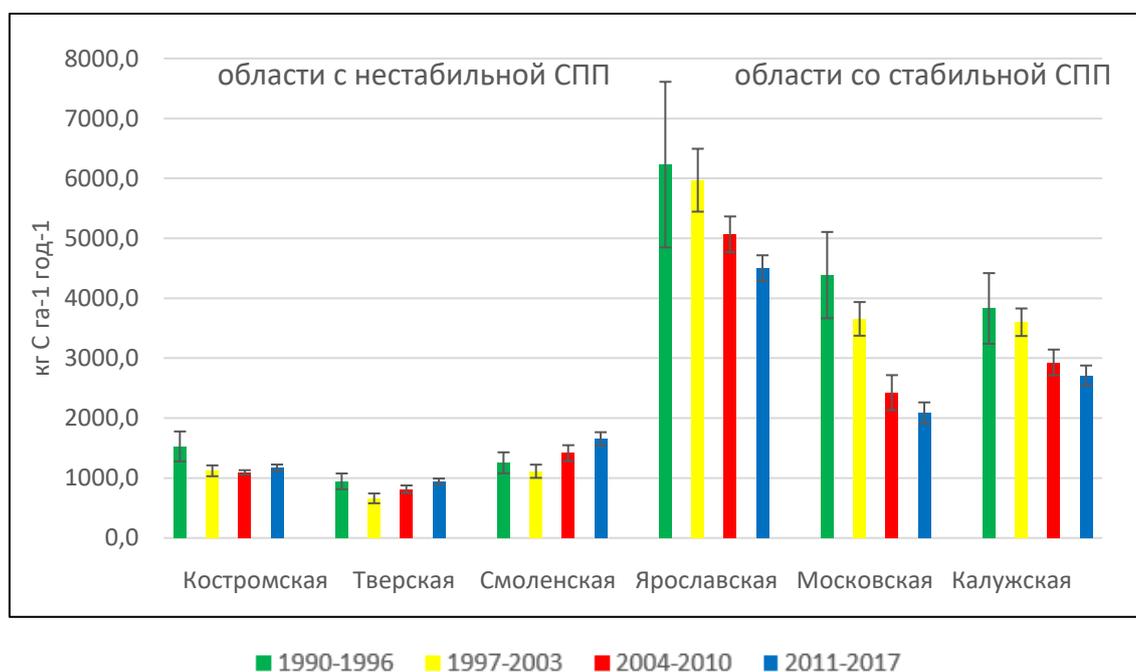


Рисунок 40. Пространственно-временная динамика дыхания почвы в областях Центрального Нечерноземья (СПП – структура посевных площадей)

На протяжении всего рассматриваемого отрезка времени на севере, в Тверской области, дыхание почвы не превышает $1000 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ из-за невысокого уровня интенсификации сельскохозяйственного производства, в том числе малого количества вносимых удобрений и небольшой биомассой

возделываемых культур, а также более низких температур по сравнению с областями, расположенными южнее.

Суммарное дыхание почвы (рис. 41) зависит, прежде всего, от площади пахотных земель. В связи с тем, что в Нечерноземье наблюдается тенденция к ее снижению, значения суммарной эмиссии CO_2 из почвы убывают от 0,8-1,4 млн. т $\text{га}^{-1} \text{год}^{-1}$ в 1990-1996 г. до 0,2-0,3 млн. т $\text{га}^{-1} \text{год}^{-1}$ в 2011-2017 гг.

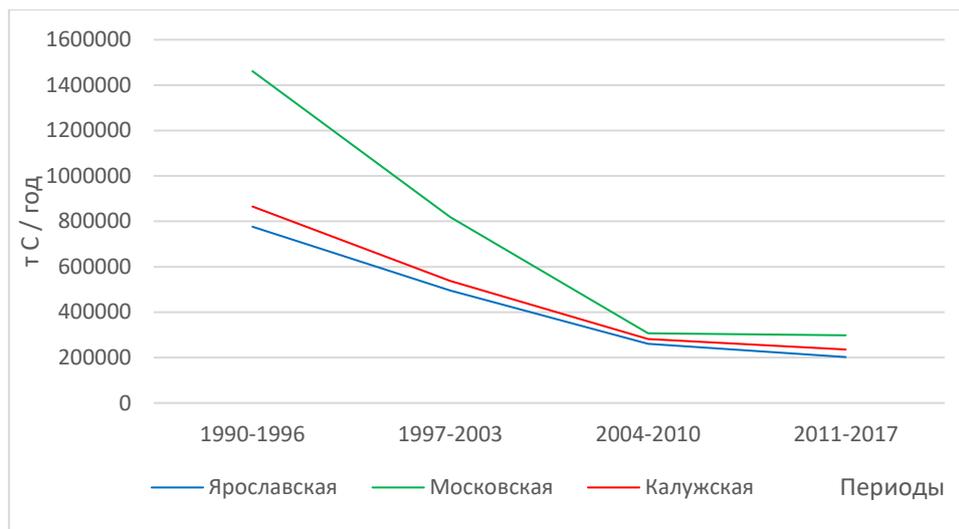


Рисунок 41. Суммарное дыхание пахотных почв в областях Центрального Нечерноземья со стабильной СПП

Выводы о том, что при сельскохозяйственным землепользовании содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве снижается, содержатся во множестве работ (Kolchugina et al., 1995; Lal, 2004; Семенов и др., 2008; Ларионова и др., 2010; Чимитдоржиева, Чимитдоржиева, 2010; Марковская и др., 2014; Косолапов и др., 2015). Количественные оценки динамики $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве (рис. 42) в настоящем исследовании преимущественно зависят от набора возделываемых в области культур и вносимых под них удобрений. На севере, в Костромской и Тверской областях, где преобладают яровые зерновые культуры (ячмень и овес), в технологии возделывания которых не предусмотрено внесение органических удобрений, отмечается отрицательная динамика $\text{C}_{\text{орг}}$. Но постепенно за 2004-2017 гг. численные значения его потери из почвы снижаются из-за усиления интенсификации сельского хозяйства, роста урожайности и увеличения количества вносимых минеральных удобрений.

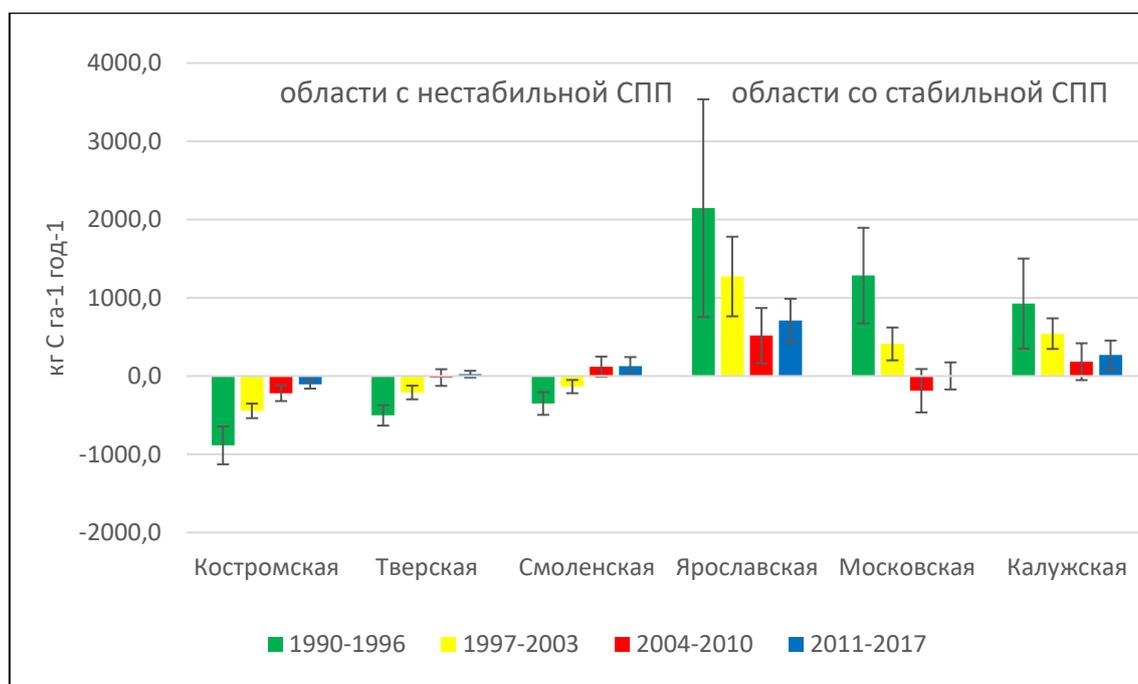


Рисунок 42. Пространственно-временная динамика органического углерода в почве в областях Центрального Нечерноземья

И наоборот, в Московской, Калужской и Ярославской областях, где в севообороты включены такие высокотоварные культуры как озимая пшеницы и картофель, под которые вносится большое количество как минеральных, так и органических удобрений, наблюдается положительная динамика $C_{орг}$. Хотя интенсивность его накопления в почве постепенно уменьшается вследствие снижения доз вносимых удобрений: до 32-55 кг/га азотных минеральных и 0,5-2,5 т/га органических под озимую пшеницу; 40-110 кг/га азотных минеральных и 0,5-30 т/га органических под картофель в 2011-2017 гг.

Для всех областей характерно снижение абсолютных значений изменения содержания $C_{орг}$ в почве за год, т.е. снижение интенсивности как его потери, так и накопления. Подобная динамика отмечена также в монографии (Федоров, 2017), где сокращение выбросов CO_2 и накопление его в геосистеме за счет поглощения из атмосферы связывается с переводом значительных площадей пахотных почв в сенокосы и пастбища, а также последующим снижением внесения удобрений в используемые пашни.

В работе (Kirschbaum, Mueller, 2001) отмечается, что в агроландшафтах при

возделывании однолетних культур разрушение и последующие потери почвенного С происходят постоянно, вследствие чего положительные значения NEE, чаще всего, связаны с потерями $C_{\text{орг}}$ и дальнейшей деградацией экосистемы. В Нечерноземном регионе, кроме Ярославской области, где количество вносимых удобрений продолжает оставаться высоким, значения чистого экосистемного обмена (рис. 43) меняются с положительных значений, т.е. с эмиссии CO_2 из экосистемы в атмосферу, в начале рассматриваемого периода на отрицательные, т.е. на его поглощение и накопление после 2010 г. Отчасти этому также способствует растущая концентрация CO_2 в атмосфере, о чем уже упоминалось выше.

Значения суммарного нетто-баланса CO_2 (рис. 44) в агроландшафтах Нечерноземья уменьшается параллельно снижению посевных площадей и количеству вносимых удобрений. И если в 1990-е гг. экосистемы служили источником CO_2 для атмосферы со средней скоростью его поступления $0,4-0,8$ млн. т С га⁻¹ год⁻¹, то в 2000-е гг. оценки чистого экосистемного обмена приближаются к нулевым и отрицательным значениям.

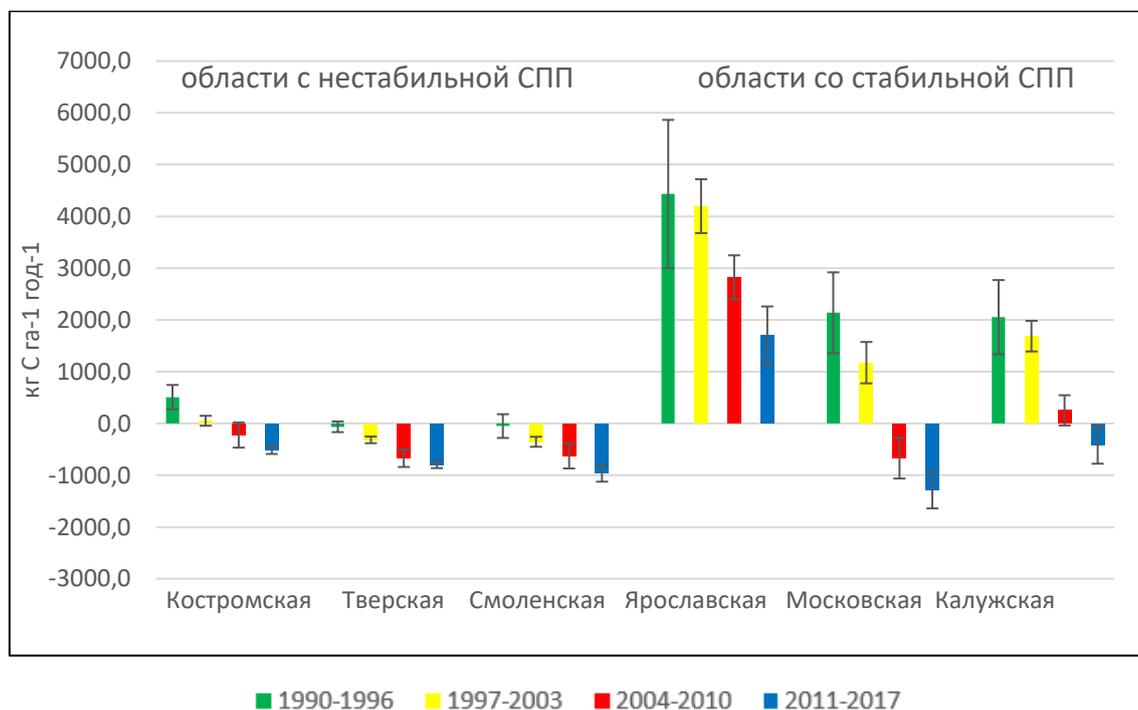


Рисунок 43. Пространственно-временная динамика нетто-экосистемного обмена в областях Центрального Нечерноземья

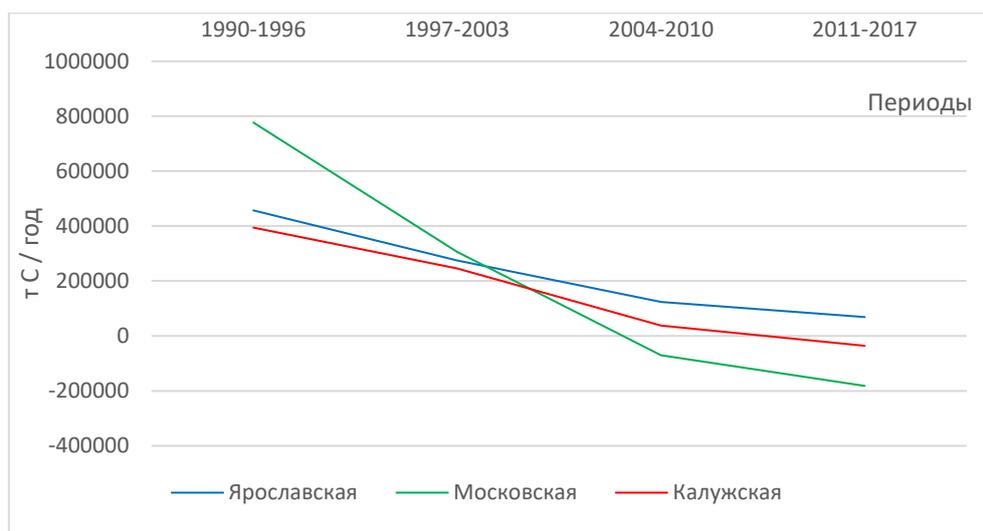


Рисунок 44. Суммарный чистый экосистемный обмен агроландшафтов в областях Центрального Нечерноземья со стабильной СПП

Таким образом, на основании направления и интенсивности потоков CO_2 рассматриваемые агроландшафты Нечерноземья могут быть разделены на две группы:

- первая, включающая центральные Московскую, Калужскую и Ярославскую области, характеризуется стабильной структурой посевных площадей, наличием в севооборотах ключевых товарных культур региона (озимой пшеницы и картофеля), положительным балансом $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве ($0 \dots +2000 \text{ кг га}^{-1} \text{ год}^{-1}$) и интенсивным почвенным дыханием ($2000-6000 \text{ кг га}^{-1} \text{ год}^{-1}$);
- вторая, включающая периферийные Костромскую, Смоленскую и Тверскую области, отличается бедным и нестабильным набором возделываемых культур, низкой интенсивностью сельскохозяйственного производства, вследствие чего почва теряет $\text{C}_{\text{орг}}$ ($0 \dots -900 \text{ кг га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), а ее дыхание не превышает $2000 \text{ кг га}^{-1} \text{ год}^{-1}$.

Динамика чистого экосистемного обмена в большинстве областей направлена на переход от потери CO_2 из экосистемы в 1990-е гг. на поглощение в ней в 2010-е гг. Значения совокупных потоков CO_2 в регионе уменьшаются вследствие сокращения площадей пахотных земель.

4.5. Выводы

1. В рамках разработанной методики применения модели DNDC в России были обоснованы и скорректированы ее внутренние настройки и параметры в блоках характеристик почвенного покрова и биологических особенностей возделываемых культур для приведения их в соответствии с географическими условиями страны; а также описана и аргументирована технология сбора и подготовки метеорологических данных, сведений об урожайности, агротехнике и вносимых удобрениях для их последующего использования в моделировании.

2. Отмечено, что наиболее значимыми факторами, определяющими особенности биогеохимического цикла C и потоков CO₂ в пахотных почвах Центрального Нечерноземья, являются антропогенные факторы, и прежде всего вносимые удобрения (для всех выходных параметров модели). Среди природных факторов ключевое влияние оказывают гранулометрический состав почвы и погодные условия, а также биологические особенности культур.

3. На примере опытов КБС и ИФХиБПП РАН при различных почвенно-климатических условиях и интенсивности сельскохозяйственного производства модель DNDC прогнозирует рост абсолютных значений потоков CO₂ в агроландшафтах – фотосинтеза и дыхания почвы – при повышении его атмосферной концентрации, за счет чего баланс C_{орг} в пахотных почвах Европейской территории России через 15-20 лет может достигнуть равновесия.

4. Для оценки зависимости динамики компонентов биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах от их географического положения была рассчитана динамика дыхания почвы, нетто-экосистемного обмена и почвенного C_{орг} в Центральном Нечерноземье по семилетиям за 1990-2017 гг. По результатам анализа были построены карты, на основе которых можно проследить изменения потоков CO₂ в каждой области изучаемого региона в пространстве и времени в зависимости от типа почвы и преобладающих культур. Также был подтвержден полученный ранее вывод о преимущественном влиянии на потоки CO₂ антропогенного фактора через набор возделываемых культур и применяемые

технологии, интенсивность механизации и химизации.

5. Области Центрального Нечерноземья на основании динамики и направления потоков CO_2 можно разделить на две группы: центральную с интенсивным почвенным дыханием и накоплением $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве и периферийную с потерей почвенного $\text{C}_{\text{орг}}$ и низкой интенсивностью ее дыхания.

6. В настоящее время агроландшафты Центрального Нечерноземья в течение вегетационного сезона выступают как поглотители CO_2 из атмосферы. В почве под культурами, в технологии возделывания которых предусмотрено внесение органических удобрений, $\text{C}_{\text{орг}}$ накапливается, а в случае их отсутствия почва теряет $\text{C}_{\text{орг}}$. В Московской, Калужской и Ярославской областях, для которых характерна наиболее стабильная структура посевных площадей, суммарные значения дыхания почвы и чистого экосистемного обмена снижаются вследствие сокращения пахотных площадей за последние три десятилетия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен статистический анализ зависимости потоков CO_2 в агроландшафтах от гидротермических параметров среды и их имитационное моделирование на основе модели DNDC.

Дыхание пахотного выщелоченного чернозема в Курской области в течение вегетационного периода варьировало от $0,138 \pm 0,068 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ под яровым ячменем до $0,173 \pm 0,115 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ под озимой пшеницей. Дыхание агросерой лесной почвы под зернопаровым севооборотом в Московской области было равно $0,046 \pm 0,048 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Нетто-экосистемный обмен CO_2 полупустынных полынных пастбищ на серо-бурых почвах Самаркандской области составил $0,121 \pm 0,148 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$.

Для дыхания выщелоченных черноземов под ячменем, подсолнечником и картофелем отмечались средние корреляции с температурой почвы на уровне $r_p = 0,52-0,57$, $P < 0,05$. Дыхание серых лесных почв под зернопаровым севооборотом зависело от термического режима почвы и воздуха на уровне $r_p = 0,47-0,60$, $P < 0,001$. Для чистого экосистемного обмена полынных пастбищ были получены слабые положительные корреляции с режимом тепла $r_p = 0,24-0,33$, $P < 0,001$, и отрицательные – с влажностными характеристиками среды $r_p = -0,21- -0,33$, $P < 0,001$.

Согласно полученным регрессионным зависимостям потоков CO_2 от погодно-климатических условий, дыхание пахотного выщелоченного чернозема в течение вегетационного периода на 27-32% определяется температурой почвы; динамика эмиссии из серой лесной почвы на 31-41% зависит от ее температуры и влажности; температура воздуха и осадки определяют не более 16% дисперсии баланса CO_2 в экосистеме полупустынного пастбища.

Проведена апробация имитационной модели DNDC для определения возможности ее применения на территории России с целью оценки потоков CO_2 в агроландшафтах, по результатам которой признано, что она может использоваться для анализа и прогноза чистого экосистемного обмена и эмиссии CO_2 из почв

сельскохозяйственного назначения.

Были разработаны практические рекомендации для применения модели DNDC на территории России и методика использования сведений официальной статистики и информации литературных источников для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода в пахотных почвах Европейской части страны. Были скорректированы внутренние параметры DNDC, включающие характеристики почвенного покрова (глубина пахотного горизонта, соотношение C:N и фракций органического вещества) и биологические особенности возделываемых культур (потребности в тепле и влаге, соотношение C:N и фракций биомассы), и обоснованы принципы подготовки входной информации по природным (почвенно-климатические условия) и антропогенным (обработка почвы, внесение удобрений, урожайность) факторам.

Оценка эффективности моделирования путем сравнения результатов, рассчитанных DNDC, с опытными и литературными данными показывает, что модель дает адекватные оценки потоков CO₂ в агроландшафтах. Верификация разработанного подхода на примере эмиссии CO₂ и баланса C в пахотных почвах Московской, Владимирской и Орловской областей доказала его эффективность при оценке составляющих биогеохимического цикла углерода на Европейской территории России. Кроме того, модель позволяет компенсировать недостаток исходных данных за счет встроенных функций, а также разделить составляющие биогеохимического цикла C. Так, соотношение корневого и микробного дыхания она верно определяет в 0,33:0,67, а отношение дыхания растений и фотосинтеза при оценке чистого экосистемного обмена – в 0,34-0,36.

При сравнении эффективности моделирования с помощью DNDC и регрессионных уравнений отмечено, что имитационная модель более точно и качественно рассчитывает параметры потоков CO₂ в агроландшафтах, что подтверждается высокими корреляциями между наблюдаемыми и расчетными величинами, равенством их средних значений и дисперсий.

Обнаруженным недостатком модели является иногда возникающее в летнее время на фоне высоких температур воздуха занижение интенсивности дыхания

корней по сравнению с опытными данными, в связи с чем пики эмиссии CO_2 могут недооцениваться. Это связано со встроенной в модель функцией снижения роста растений при превышении оптимального температурного порога, отсутствии осадков в период активного роста и ограниченного содержания азота в почвенном профиле.

Модельные эксперименты по оценке влияния внешних условий на формирование потоков CO_2 в агроландшафтах были реализованы на примере Центрального Нечерноземья на основе принципа последовательного включения антропогенных факторов по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы от чистого пара через неудобряемые агроценозы к агроландшафтам интенсивного типа с повышенными дозами удобрений. По результатам работы с моделью определено, что наиболее значимым фактором, определяющим особенности биогеохимического цикла С на Европейской территории России, являются удобрения. Если минеральные азотные удобрения примерно в 3 раза увеличивают интенсивность эмиссии CO_2 из почвы и накопления в ней $\text{C}_{\text{орг}}$ по сравнению с парующей почвой, то для органических этот показатель возрастает до 22-30 раз.

Эмиссия CO_2 из почвы прямо пропорциональна интенсивности ее обработки, но также существенно зависит от природных факторов: складывающихся погодноклиматических условий, гранулометрического состава почвы и биомассы сельскохозяйственных культур. При этом требования растений к теплу и влаге не оказывают значимого влияния на результаты моделирования вследствие схожести их у культур одного климатического пояса.

Модель DNDC позволяет связать геохимические процессы в атмосфере, биосфере и почвенном покрове и прогнозирует увеличение абсолютных значений потоков CO_2 , в частности фотосинтеза и дыхания почвы, в агроландшафтах в ответ на современное повышение его концентрации в атмосфере. Для неудобряемых серых лесных почв Московской области и выщелоченных черноземов Курской области при использовании удобрений она прогнозирует возможное достижение нулевого баланса почвенного $\text{C}_{\text{орг}}$ через 15-20 лет.

С помощью имитационного моделирования были восстановлены ключевые потоки CO_2 в агроландшафтах Нечерноземья – дыхание почвы, чистый экосистемный обмен, а также изменение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве за 1990-2017 гг. по семялетиям, динамика которых совпадает с изменением количества вносимых удобрений и колебаниями урожайности культур.

В Калужской, Московской и Ярославской областях, для которых характерна наиболее стабильная структура посевных площадей, значения дыхания почвы снижаются, а направление чистого экосистемного обмена меняется от потери CO_2 из агроэкосистемы в 1990-е гг. на поглощение и накопление в ней в течение вегетационного сезона в 2011-2017 гг. Значения совокупных потоков CO_2 в регионе уменьшаются вследствие сокращения площадей пахотных земель.

Внесение органических удобрений под культуру позволяет накапливать $\text{C}_{\text{орг}}$, тогда как при их отсутствии почва теряет $\text{C}_{\text{орг}}$. Таким образом, его динамика в почве зависит от набора возделываемых культур, их агротехники и химизации производства.

По итогам выполнения поставленных задач можно сделать следующие **выводы**:

1. Была разработана методика применения имитационной модели DNDC для условий России, в том числе на базе сведений официальной статистики и информации литературных источников были скорректированы ее внутренние параметры и обоснованы принципы подготовки входной информации. По результатам апробации была подтверждена эффективность этого подхода для оценки составляющих биогеохимического цикла углерода, в частности потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории страны.

2. DNDC более точно и качественно рассчитывает параметры дыхания почвы и нетто-экосистемного обмена по сравнению с регрессионными моделями, ее выходные данные совпадают с результатами полевых измерений. Недостатком модели является занижение интенсивности дыхания корней в летнее время, в связи с чем пики эмиссии CO_2 могут недооцениваться.

3. По оценкам на основе модели DNDC, абсолютные значения потоков CO_2 в агроландшафтах будут увеличиваться пропорционально повышению его концентрации в атмосфере, приводя к возможному достижению нулевого баланса $\text{C}_{\text{орг}}$ в пахотных почвах Европейской территории России.

4. По данным моделирования, агроландшафты Центрального Нечерноземья в течение вегетационного сезона выступают как поглотители CO_2 из атмосферы. На основе географического положения и антропогенного воздействия их можно разделить на две группы: центральная с интенсивным хозяйствованием и стабильной структурой посевных площадей, для которой характерно накопление $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве и значительное ее дыхание, и периферийная, отличающаяся потерей $\text{C}_{\text{орг}}$ из почвы и низкой интенсивностью дыхания.

5. Для потоков CO_2 в агроландшафтах отмечаются средние прямые корреляции с температурой и слабые обратные – с влажностными характеристиками среды. Согласно результатам регрессионного анализа, преимущественное влияние на биогеохимический цикл углерода в агроландшафтах оказывает антропогенный фактор, тогда как погодно-климатические условия объясняют около трети дисперсии эмиссии CO_2 из почвы и не более 1/6 баланса CO_2 в экосистеме. По итогам имитационного моделирования определено, что ключевым антропогенным фактором формирования динамики потоков CO_2 являются вносимые удобрения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ВНИИ ГМИ – МЦД – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Международный центр данных

ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система

ИФХиБПП РАН – Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

КБС ИГ РАН – Курская биосферная станция Института географии РАН

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ПГ – парниковые газы

СамГУ – Самаркандский государственный университет

$C_{\text{орг}}$ – органический углерод (в почве)

СПП – структура посевных площадей

ФАО – Продовольственная и сельскохозяйственная организация

ФАР – Фотосинтетически активная радиация

C – углерод

CH_4 – метан

CO_2 – диоксид углерода, углекислый газ

DNDC – DeNitrification-DeComposition – Денитрификация-Разложение

N – азот

N – объем выборки, число измерений

N_2O – закись азота

NEE – net ecosystem exchange – чистый (нетто-) экосистемный обмен

F – критерий Фишера

$F_{\text{крит}}$ – критическое значений критерия Фишера

P – уровень значимости

R^2 – коэффициент детерминации

r_p – коэффициент корреляции Пирсона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авксентьев А.А. Эмиссия парниковых газов (CO_2 , N_2O , C_2F_6) черноземом обыкновенным Каменной степи. – Автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.02.13. – Воронеж, ВГУ, 2011. – 21 с.
2. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. акад. РАСХН В.И. Кирюшина, акад. РАСХН А.Л. Иванова. – М.: ФГНУ "Росинформагротех", 2005. – 784 с.
3. Алексеев В.А., Янников И.М., Янников Р.И. Применение экономических механизмов Киотского протокола на основе системы оценки экономической эффективности проекта // Перспективы науки. 2010. № 4 (06). С. 96-102.
4. Алексеева А.А., Фомина Н.В. Анализ активности редуцирующих ферментов агрогенно измененных почв лесных питомников лесостепной зоны Красноярского края // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2015. № 1. С. 32-35.
5. Алиев А.М., Варламов В.А., Державин Л.М., Самойлов Л.Н., Переведенцева С.В., Яковлева Т.А. Эффективность удобрений при их комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте (опыт СШ-2/60) // Результаты длительных исследований в системе географической сети опытов с удобрениями российской Федерации. К 70-летию Геосети. – М.: ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова РАСХН, 2011. – С. 17-33.
6. Ананьева Н.Д. Разделение почвенного грибного и бактериального дыхания, влияние структуры "грибы/бактерии" на продуцирование парниковых газов (N_2O , CO_2) почвами разного землепользования. – Пушкино: ИФХиБПП, 2007. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_56087.
7. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Оценка изменения эмиссии парниковых газов их многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях глобального потепления // Современные проблемы экологической метеорологии и

климатологии. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – С. 114-138.

8. Антоновский М.Я., Минин А.А., Колосов П.А., Миловидова С.В., Пивоваров В.А. Пространственно-временная классификация растительности и ее биологической активности на базе спутниковых наблюдений: отчет о НИР. – М.: ИГКЭ, 1999. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=750316>.

9. Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского Ополья // Криосферы Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 80-86.

10. Бабаев М.П., Рамазанова Ф.М. Воспроизводство плодородия орошаемых серо-бурых почв аридной зоны Азербайджана // Живые и биокосные системы. 2017. № 21. URL: <http://www.jbks.ru/assets/files/content/2017/issue21/article-4.pdf>.

11. Базилевич Н.И. Иерархические концептуальные балансовые модели экосистем и почвы в связи с некоторыми аспектами эволюции биосферы // Моделирование биогеоценологических процессов. – М.: Наука, 1981. – С. 69–85.

12. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 381 с.

13. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Особенности функционирования травяных экосистем // Журнал общей биологии. 1978. № 1. С. 34–52.

14. Балашов Е.В., Бучкина Н.П., Рижия Е.Я., Павлик С.В. Прямые измерения и прогноз эмиссии закиси азота из почв с помощью модели DNDC // Снижение отрицательного воздействия на окружающую среду химически активного азота при производстве сельскохозяйственной продукции. – СПб.: Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, 2010. – С. 60-68.

15. Безуглова О.С., Юдина Н.В. Взаимосвязь физических свойств и гумусированности в черноземах юга Европейской России // Почвоведение. 2006. № 2. С. 211-219.

16. Белобров В.П., Замотаев И.В., Овечкин С.В. География почв с основами почвоведения. – М.: Академия, 2004. – 352 с.

17. Белюченко И.С., Смагин А.В., Попок Л.Б., Попок Л.Е. Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2015. – 313 с.
18. Благодатский С.А. Микробная биомасса и моделирование цикла азота в почве. – Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.03, 03.02.13. – Пущино: ИФХиБПП РАН, 2011. – 51 с.
19. Благодатский С.А., Благодатская Е.В. Динамика микробной биомассы и соотношение эукариотных и прокариотных микроорганизмов в серой лесной почве // Почвоведение. 1996. № 12. С.1485-1490.
20. Благодатский С.А., Ларионова А.А., Евдокимов И.В. Действие минеральных соединений азота на интенсивность дыхания и эффективность роста микроорганизмов в почве // Почвоведение. 1992. № 9. С. 88–96.
21. Бобрик А.А. Закономерности эмиссии парниковых газов почвами северотаежных и лесотундровых экосистем Западной Сибири. – Дисс. ... канд. биол. наук: 03.02.13. – М.: МГУ, 2016. – 166 с.
22. Богатырева Е.Н., Бирюкова О.М., Серая Т.М. Сравнительная оценка методов экстрагирования активных компонентов гумуса дерново-подзолистой супесчаной почвы // Наследие И.В. Тюрина в современных исследованиях в почвоведении: Материалы Международной научной конференции. – Казань: Отечество, 2013. – С. 32-35.
23. Бойцова Л.В., Зинчук Е.Г., Неприимерова С.В. Секвестрация углерода в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности // Эмиссия парниковых газов и секвестрация углерода в почвах: Материалы научного семинара с международным участием. – СПб.: Агрофизический НИИ, 2015 г. – С. 6-8.
24. Борисов А.А. Климаты СССР. – М.: Государственное учебно-педагогическое издательство Министерства просвещения РСФСР, 1948. – 224 с.
25. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. – М.: LICOR Biosciences, Российская академия наук, Институт проблем экологии и

эволюции им. А.Н. Северцова, 2016. – 223 с.

26. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Рижия Е.Я., Павлик С.В. Эмиссия N_2O из супесчаных дерново-подзолистых почв и ее прогнозирование с помощью модели DNDC // Современная агрофизика – Высоким технологиям: Материалы Международной конференции (к 75-летию образования агрофизического института). – СПб: Агрофизический НИИ РАСХН, 2007. – С. 272-273.
27. Бюллетень ВМО по парниковым газам. – 2011. – № 7. – 4 с.
28. Бюллетень ВМО по парниковым газам. – 2012. – № 8. – 4 с.
29. Вареник А.В. Пространственное распределение потока неорганического азота с атмосферными осадками на поверхность Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 19. С. 395-400.
30. Вареник А.В., Коновалов С.К., Метик-Диюнова В.В. Оценка роли атмосферных осадков в пространственно-временном изменении распределения неорганических соединений азота в поверхностном слое вод Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 268-273.
31. Власенко А.Н., Шарков И.Н., Шепелев А.Г., Самохвалова Л.М., Прозоров А.С. Баланс углерода в черноземе выщелоченном при использовании его в различных севооборотах лесостепи Приобья // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2009. № 6. С. 5-13.
32. Власенко О.А. Интенсивность поступления и разложения растительных остатков в агроэкосистемах многолетних бобовых трав // Почвы Сибири: особенности функционирования, использования и охраны – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2012. – С.98-104.
33. Внесение удобрений под урожай 1990-2014 гг. и проведение работ по химической мелиорации земель. – М.: Росстат, ГМЦ, 1991-2015. – 64 с.
34. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. №3. С. 298–313.

35. Гавриленко В.А. Мировой рынок минеральных удобрений // Вестник химической промышленности. 2016. № 5. URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/mirovoj-rynok-mineralnykh-udobrenij>.
36. Гаврилович А.С. Практическое руководство по выращиванию зерна пивоваренного ячменя в Калужской области – Калуга: НИПТИ АПК, 2007. – 13 с.
37. Галицкий В.В., Комаров А.С. О системах дифференциальных уравнений, описывающих разложение органического вещества почв // Почвоведение и агрохимия (проблемы и методы). – Пушкино: ОНТИ НЦБИ, 1977. – С. 218.
38. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А. Гумусообразование и агрономическая оценка органического вещества почв. – М.: Агроконсалт, 1997. – 82 с.
39. Гедгафова, Ф.В., Улигова Т.С., Горобцова О.Н., Темботов Р.Х. Биологическая активность черноземных почв Центрального Кавказа (в пределах терского варианта пояности Кабардино-Балкарии) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1474-1482.
40. Гейнак В., Ефимов В., Осипов А. Роль гумуса и азота удобрений в продуктивности ячменя // Доклады РАСХН. 1998. № 3. С. 21-22.
41. Геннадиев А.Н., Глазовская М.А. География почвы с основами почвоведения. – М.: Высшая школа, 2005. – 461 с.
42. Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон, К.Р., Качинский В.Л. Эрозия и потери органического углерода почв при распашке склонов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2010. № 6. С. 32-38.
43. Герасимова М.И. География почв России. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 312 с.
44. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. № 2. С. 1-53.
45. Глазунов Г.П., Панкова Т.И., Брескина Г.М. Влияние степени антропогенной нагрузки на отдельные компоненты органического вещества почвы // Успехи современной науки. 2016. Т. 5. № 9. С. 179-182.
46. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеев А.В. Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // Известия РАН. Физика атмосферы

и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 255-270.

47. Гончарова О.Ю., Телеснина В.М. Биологическая активность постагрогенных почв (на примере Московской области) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2010. № 4. С. 24-31.

48. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель Российской Федерации в 2013 году. – М.: Росреестр, 2014. – 196 с.

49. Грачев В.А. Типовые технологические карты для планирования и организации производства зерна, кормов, картофеля и льна-долгунца в хозяйствах Центрального района Нечерноземной зоны РСФСР. – М.: М-во сел. хоз-ва РСФСР, ВНИИ экономики, труда и упр. в сел. хоз-ве, 1980. – 145 с.

50. Григорьев А.А. Закономерности строения и развития географической среды. – М.: Мысль, 1966. – 382 с.

51. Грин А.М. Комплексные стационарные исследования как инструмент познания временной структуры геосистем // Известия АН СССР. Серия географическая. 1984. № 6. С. 20-28.

52. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 194 с.

53. Дегтярев В.В., Панасенко О.С., Недбаев В.Н. Содержание коллоидных форм гумуса в структурных агрегатах черноземов типичных при различных условиях лесостепи Украины // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 5. С. 60-62.

54. Дженик Дж. Основы садоводства. Пер. с. англ. Н.С. Тарасенко. – М.: Колос. 1975. – 544 с.

55. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Высшая школа, 1998. – 413 с.

56. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. – М.: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС», 2004. – 460 с.

57. Донская О.Л. Запасы и потоки углерода в агроценозах Минусинской впадины. – Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. – Красноярск: Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, 2004. – 183 с.

58. Дудина Н.Х., Панова Е.А., Петухов М.П. Агрохимия и система удобрений. – М.: Агропромиздат, 1991. – 400 с.
59. Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М, Лопес де Гереню В.О., Бан М. Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO₂ из почвы методом субстратно-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2010. № 3. С. 349-355.
60. Евдокимов И.В., Рузер Р., Бюггер Ф., Маркс М., Мюнх Ж.Ш. Круговорот углерода в ризосфере при постоянном мечении растений в атмосфере C¹³-CO₂: разделение корневого, микробного и ризомикробного дыхания // Почвоведение. 2007. № 9. 1086-1094.
61. Евстропов А.С. Компьютеризированная система мониторинга и анализа результативности применения инновационных технологий производства картофеля: научное издание – Рязань: ГНУ ВНИМС, 2011. – 108 с.
62. ЕМИСС. Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <http://fedstat.ru/indicators/themes.do>. (дата обращения 01.08.2018 г.)
63. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. – 768 с.
64. Жариков В.В. Региональная экономика. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 96 с.
65. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. – М.: Наука, 2004. – 348 с.
66. Заварзин Г.А., Васильева Л.В. Цикл метана на территории России // Круговорот углерода на территории России / Под ред. Лаверова Н.П. и Заварзина Г.А. – М.: Моск. фил. ГНИЦ прогнозирования и предупреждения геоэкол. и техноген. катастроф при КубанГУ, 1999. – С. 202-230.
67. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник Российской Академии Наук. 2006. Т. 76. № 1. С. 14-29.
68. Завьялова Н.Е., Митрофанова Е.М., Казакова И.В. Влияние минеральных удобрений и извести на содержание активных компонентов в составе органического вещества дерново-подзолистой почвы и урожайность яровой

пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 11. С. 19-20.

69. Задорожний А.Н., Семенов М.В., Ходжаева А.К., Семенов В.М. Почвенные процессы продукции, потребления и эмиссии парниковых газов // Агрохимия. 2010. № 10. С. 75-92.

70. Зайдельман Ф.Р., Банников М.В., Ковалев И.В., Никифорова А.С., Рыдкин Ю.И., Чумичева Г.Д., Шваров А.П. Исследования закономерностей гидротермического режима, баланса углерода и эмиссии углекислого газа при антропогенном воздействии на торфяные почвы // Информационный бюллетень РФФИ. 1996. № 4. Биология, медицинская наука. – Отчет о НИР № 96-04-48523 (РФФИ).

71. Замолотчиков Д.Г. Современные антропогенные модификации глобальных биогеохимических циклов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3. С. 23-32.

72. Зинченко С.И. Григорьев А.А., Антонов С.М., Климова Т.В., Безменко А.А. Регистр технологий возделывания зерновых культур для условий опольной зоны Владимирской области. – Владимир: Владимирский НИИСХ, 2012. – 56 с.

73. Зинякова Н.Б. Активное органическое вещество в серой лесной почве при органической и минеральной системах удобрения. – Дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04. – Пущино: ИФХиБПП РАН, 2014. – 167 с.

74. Иванов И.В., Песочина Л.С., Семенов В.М. Биоминерализация органического вещества в современных целинных, пахотных, погребенных и ископаемых черноземах // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1192-1202.

75. Иванов Ю.Д. Динамика органического вещества и баланс азота в прифермских севооборотах и под бессменными культурами на дерново-слабоподзолистой почве. – Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – М.: ТСХА, 1969. – 15 с.

76. Исаичева У.А., Труфанов А.М. Баланс гумуса дерново-подзолистой супесчаной почвы при многолетнем агротехническом использовании // Вестник АПК Верхневолжья. 2015. № 3 (31). С. 43-46.

77. Исмагилова Н.Х. Изменение содержания и качества органического вещества

- в агросерых почвах Нечерноземной зоны в зависимости от антропогенного воздействия // Бюллетень почвенного института. 2010. № 65. С. 16-22.
78. Камышова Г.Н., Корсак В.В., Фалькович А.С., Холуденева О.Ю. Математическое моделирование в компонентах природы. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2012. – 161 с.
79. Канамару Х. Продовольственная безопасность в условиях изменения климата // Бюллетень ВМО. 2009. Том 58. № 3. С. 205-209.
80. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580-594. (а)
81. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В., Почикалов А.В., Краев Г.Н. Межгодовые измерения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // Журнал общей биологии. 2013. Т. 74. № 1. С. 3-22.
82. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Почикалов А.В., Гитарский М.Л. Микробная и корневая составляющие дыхания дерново-подзолистых почв южной тайги // Лесоведение. 2017. № 3. С. 183-195. (б)
83. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. №11. С. 1354-1366.
84. Карпов А.М. Техническое обеспечение технологий в растениеводстве. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. – 200 с.
85. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы ее изучения. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 191 с.
86. Кидин В.В., Гущина Е.О., Зенкина В.В. Потребление разных форм азота кормовой свеклой и особенности его трансформации в почвенном профиле // Известия ТСХА. 2009. Вып. 1. С. 5-12.
87. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1997. URL:

http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/kyoto.pdf. (дата обращения 01.08.2018 г.)

88. Когут Б.М., Семенов В.М. Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе // *Агрохимия*. 2015. № 12. С. 3-19.
89. Когут Б.М., Яшин М.А., Семенов В.М., Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г., Лукин С.М., Тарасов С.И. Распределение трансформированного органического вещества в структурных отдельностях дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Почвоведение*. 2016. № 1. С. 52-64.
90. Козунь Ю.С. Влияние климата на биологические свойства почв юга России. – Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2014. – 153 с.
91. Коледа К.В., Дудук А.А., Брукиш Д.А., Бояр Д.М., Витковский Г.В., Емельянова В.Н., Золотарь А.К. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 340 с.
92. Комаров А.С., Припутина И.В., Михайлов А.В., Чертов О.Г. Биогеохимический цикл углерода в лесных экосистемах центра Европейской России и его техногенные изменения // *Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв*. – М.: наука, 2006. – С. 362-377.
93. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. – М.: Логос, 2003. – 576 с.
94. Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. – М.: Наука, 2015. – 198 с.
95. Костин С.И., Покровская Т.В. Климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1953. – 427 с.
96. Костычев П.А. Почвы чернозёмной области России: их происхождение, состав и свойства. – М.: Сельхозгиз, 1949. – 239 с.
97. Кравченко И.К., Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Быкова С.А., Дулов Л.Е., Пардини Д., Гисперт М., Боукс П., Ван Климпут О., Гальченко В.Ф. Физико-химические и биологические факторы, контролирующие окисление атмосферного

- метана в серых лесных почвах // Микробиология. 2005. Т. 74. № 2. С. 255–260.
98. Крапивин В.Ф., Свирежев Ю.М., Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
99. Кудеяров В.Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота // Почвоведение. 1999. № 8. С. 988–998.
100. Кудеяров В.Н. Роль почв в круговороте углерода // Почвоведение. 2005. № 8. С. 915-923.
101. Кудеяров В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. – М.: Наука, 1989. – 216 с.
102. Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Кузнецова Т.В., Тимченко А.В. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33-42.
103. Кузнецова Т.В., Удальцов С.Н., Демкин В.А. Минерализация активного органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 3. С. 978-981.
104. Кузяков Я.В., Ларионова А.А. Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию CO_2 из почвы (обзор) // Почвоведение. 2006. № 7. С. 842–854.
105. Курбанова А.Ю., Шалухина Н.В., Варлагин А.В., Ли Ч. Роль климатических изменений в формировании потоков CO_2 на верховом болоте // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1501-1505.
106. Курбатова А.И., Тарко А.М. Моделирование глобального биогеохимического цикла углерода и азота в системе «атмосфера – растения – почва» // Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 3. С. 40-47.
107. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. – Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.27, 03.00.16. – Пущино.: ИФХиБПП РАН, 2010. – 48 с.
108. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. Влияние температуры и влажности на эмиссию N_2O из некоторых пахотных почв // Почвоведение. 2010. № 8. С. 984-994.

109. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 6. С. 843-846.
110. Ларионова А.А., Ермолаев А.М., Никитишен В.И., Лопес Де Гереню В.О., Евдокимов И.В. Баланс углерода в пахотных серых лесных почвах при разных способах сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1464-1474.
111. Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес Де Гереню В.О. Дыхание корней и его вклад в эмиссию CO_2 из почвы // Почвоведение. 2003. № 2. С. 183-194.
112. Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Кузяков Я.В., Бюггер Ф. Идентификация лабильного и устойчивого пулов органического вещества в агросерой почве // Почвоведение. 2011. № 6. С. 685-698.
113. Ларионова А.А., Иванникова Л.А., Демкина Т.С. Методы определения эмиссии CO_2 из почвы // Дыхание почвы. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1993. – С. 11-26.
114. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // Почвоведение. 2010. № 2. С. 186-195.
115. Ларионова А.А., Сапронов Д.В., Лопес де Гереню В.О., Кузнецова Л.Г., Кудеяров В.Н. Вклад дыхания корней растений в эмиссию CO_2 из почвы // Почвоведение. 2006. № 10. С. 1248-1257.
116. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрехимия. 1977. № 8. С. 36-42.
117. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В. Измерение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрехимия. 2009. № 5. С. 5-12.
118. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н.

Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России // Почвоведение. 2001. №9. 1045-1059.

119. Лукин С.М. Эмиссия углекислого газа в агроценозах картофеля на дерново-подзолистой супесчаной почве // Владимирский земледелец. 2015. № 3-4 (74). С. 22-23.

120. Лукин С.М., Марчук Е.В. Влияние биопрепаратов ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов на урожайность сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 18-21.

121. Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья (актуальность и состояние проблемы, рабочие гипотезы исследования, сопряженность агрономических и экологических функций, динамика в агроценозах, принципы моделирования и технология воспроизводства). – М.: Россельхозакадемия, ГНУ ВНИПТИОУ, 2004. – 630 с.

122. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. – М.: ГЕОС, 2010. – 416 с.

123. Лямкина Ю.Б., Хворова Л.А. Моделирование динамики азота в почве (теоретические аспекты) // Известия Алтайского Государственного Университета. 2011. № 1-2. С. 94-97.

124. Мазиров И.М., Боротов Б.Н., Лакеев П.С., Щепелева А.С., Васенев И.И. Почвенные потоки углекислого газа в агроэкосистемах в условиях Московского региона // Земледелие. 2015. № 8. С. 17-19.

125. Макаров Б.Н. Методы изучения газового режима почв // Методы стационарного изучения почв. – М.: Наука, 1977. – С. 55-87.

126. Малханова Е.В., Егорова Р.А., Чимитдоржиева Г.Д. Баланс углерода в лугово-черноземных мерзлотных почвах юга Витимского плоскогорья // Агрохимия. 2011. № 1. С. 3-7.

127. Мамедов Д.Ш. Экологическая модель плодородия под маслиной на Апшеронском полуострове // Успехи современной науки. 2015. № 2. С. 88-93.

128. Марковская Г.К., Мельникова Н.А., Нечаева Е.Х. Биологическая активность

- чернозема обыкновенного при возделывании яровой пшеницы // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4. С. 52-56.
129. Марковская Г.К., Мельникова Н.А., Нечаева Е.Х. Влияние различных способов обработки почвы на ее биологическую активность в посевах яровой пшеницы // Аграрный научный журнал. 2014. № 2. С. 22-25.
130. Масяга Е.В., Власенко О.А. Содержание водорастворимого углерода гумуса и потенциальная эмиссия CO₂ из агрочернозема при выращивании многолетних бобовых трав // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы VII международной научно-практической конференции молодых ученых 24-26 марта 2014г. – Красноярск: КрасГАУ, 2015. – С. 50-53.
131. Машика А.В. Динамика содержания органического углерода в почвах еловых лесов подзоны средней тайги. – Дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.16. – Сыктывкар: Институт биологии Коми научный центр УрО РАН, 2005. – 203 с.
132. МГЭИК, 2006: Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Приложение 2. Сводка уравнений. МГЭИК, 2006. Подготовлено программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов // Игглестон Х.С., Буэндия Л., Мива К., Нгара Т., Танабе К. (ред.). – Хаяма, Япония: ИГЕС, 2006. – 37 с.
133. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Смягчение воздействий на изменение климата. Вклад Рабочей группы III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата» [Эденхофер, О., Р. Пичс-Мадруга, Ю. Сокона, Э. Фарахани, С. Каднер, К. Сейбот, А. Адлер, И. Баум, Ш. Брюннер, П. Айкемейер, Б. Криеманн, Ю. Саволайнен, Ш. Шлемер, К. фон Штехоф, Т. Цвикель и Дж. К. Минкс (редакторы)]. – Кембридж: Университи Пресс, Соединенное Королевство, Нью-Йорк, США., 2014. – 1435 с.
134. Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Русанов А.М., Тюгай З.Н., Ильин Л.И., Зинченко С.И., Фомин Д.С., Быкова Г.С. Пространственное распределение содержания органического вещества в почвах агроландшафтов Центрального Черноземья // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 6 (181). С. 127-130.

135. Моисеев Б.Н., Алябина И.О. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 116-127.
136. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. – М.: Наука, 1985. – 272 с.
137. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах // Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калужный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. (Под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова) – Саратов: Амирит, 2017. – 279 с.
138. Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады академии наук. 2006. Т. 407. № 3. С. 400–404.
139. Муха Д.В., Ачкасов А.Л., Трутаева Н.Н., Чигарёв А.Г. Влияние органического вещества и кальцийсодержащих соединений на плодородие серой лесной почвы // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития сельского хозяйства Центрального Черноземья». – Курск: КГСХА, 2005. – С. 164-167.
140. Нагорная О.В. Влияние различных форм природопользования на энергетические функции органического вещества чернозема типичного. – Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27, 03.00.16. – Курск, ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии, 2008. – 175 с.
141. Назаренко О.Г., Пашковская Т.Г. Продан В.И., Чеботникова Е.А. Использование соломы в качестве удобрения. – Рассвет: ФГУ ГЦАС «Ростовский», 2011. – 11 с.
142. Насыров М.Г. Инструментальный метод изучения круговорота углерода в полынно-эфемеровых экосистемах Узбекистана // Вестник Башкирского

университета. 2009. Т. 14. № 2. С. 389-390.

143. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. – Автореф. ... д-ра биол. наук: 03.00.27. – Томск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2004. – 37 с.

144. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 208 с.

145. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2007 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2009. – 353 с.

146. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2008 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2010. – 363 с.

147. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2009 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2011. – 386 с.

148. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2010 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2012. – 386 с.

149. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2011 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2013. – 421 с.

150. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2012 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет. 2014. – 479 с.

151. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2013 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2015. – 476 с.
152. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2014 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2016. – 476 с.
153. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2015 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2017. – 471 с.
154. Никитишен В.И., Личко В.И. Эффективность калийного удобрения в агроэкосистемах на серых лесных почвах Ополя Центральной России // Питание растений. 2011. № 3. С. 10-15.
155. Новиков А.А., Кисаров О.П. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 78 (04). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf>.
156. Новичихин Е.П., Тарко А.М. Имитационная модель циклов углерода и азота в океане // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 1. С. 73–77.
157. Общероссийский классификатор экономических регионов. ОК 024-95. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 100 с.
158. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. О длительном использовании удобрений на серых лесных почвах Владимирского Ополя // Аграрный вестник Верхневолжья. 2014. № 3 (8). С. 10-21.
159. Ольчев А.В. Потоки CO₂ и H₂O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценка с применением математических моделей). – Автореф. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. – М.: ИПЭЭ РАН, 2015. – 51 с.
160. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 332 с.

161. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. 1995. № 1. С. 21-32.
162. Орлова О.В. Активное органическое вещество как регулятор процессов трансформации азота и углерода в дерново-подзолистых почвах. – Автореф. ... д-ра. биол. наук: 06.01.03. – СПб.: ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии РАН, 2013. – 48 с.
163. Останина А.В. Войтович Н.В., Политыко П.М., Давыдова Н.В. Технология производства и операционная технологическая карта возделывания пшеницы яровой мягкой – М.: НИИСХ ЦРНЗ, 2008. – 38 с.
164. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // Труды главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. 2012. №565. С. 132-151.
165. Перванюк В.С. Пространственная математическая модель глобальных биогеохимических циклов углерода и азота в системе атмосфера – океан. – Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – М.: Вычислительный центр РАН, 2001. – 117 с.
166. Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М., Николаев А.А. Региональные проявления современного потепления климата в тропостратосфере Северного полушария // Известия РАН. Серия географическая. 2005. № 6. С. 6-16.
167. Перес П.Х., Дорман Л., Либин И. Space sources of Earth's climate: natural science economic aspects global warming // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 6. С. 81-82.
168. Петрова И.Ф. Концепция геоинформационно-поисковой системы географического стационара (на примере Курской биосферной станции ИГ РАН) // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 1. С. 125-130.
169. Пимахин В.Ф. Биологические и агротехнические основы возделывания подсолнечника по интенсивной технологии – Саратов: Ред.-изд. отд. Упр. изд-в, полиграфии и кн. торговли Саратов. облисполкома, 1991. – 57 с.
170. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во СПбГУ,

2011. – 390 с.

171. Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 68-74.

172. Посыпанов Г.С., Долгодворов В.Е., Жеруков Б.Х. *Растениеводство*. – М.: КолосС, 2007. – 612 с.

173. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Шанин В.Н. Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8. № 2. С. 333-343.

174. *Природно-антропогенные геосистемы Центральной лесостепи Русской равнины* // Грин А.М., Мухина Л.И., Дроздов А.В. – М.: Наука, 1989. – 276 с.

175. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России // Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. – М.: Наука, 2007. – 315 с.

176. Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Семаль В.А., Комачкова И.В. Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1-3. С. 585-589.

177. Разработка типовых технологических карт по производству основных видов сельскохозяйственных культур: Отчет о н.-и. работе по теме 4.38 // Рук.: Попов В.К., Катышева Ж.А. Исполн.: Ужукин В.Д. и др. – Раменское: Центр.-Нечернозем. зон. фил. Федер. гос. учреждения Центр. норматив.-исслед. станция, 2001. – 40 с.

178. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 N 20-р «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов».

URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_219634/a3bac553fbe6dbd70983b6ee5f809ea71d06cbb5/ (дата обращения 01.08.2018 г.).

179. Роде А.А. *Подзолообразовательный процесс*. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1997. – 454 с.

180. Романенков В.А. Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах Европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов). – Автореф. дис... д-ра биол. наук: 06.01.04. – М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2010. – 46 с.
181. Романовская А.А. Антропогенная эмиссия закиси азота сельскохозяйственными землями России. – Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. – М.: ИГКЭ, 2000. – 176 с.
182. Романовская А.А. (а) Выбросы метана и закиси азота в аграрном секторе России // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 87-97.
183. Романовская А.А. (б) Основы мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования в России. – Автореф. дисс. ... д-ра. биол. наук: 03.00.16. – М.: ИГКЭ, 2008. – 40 с.
184. Романовская А.А., Карабань Р.Т. Баланс почвенного углерода в возделываемых землях России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXI. – СПб.: Гидрометеиздат, 2007. – С. 58-74.
185. Романовская А.А., Карабань Р.Т. Региональные особенности баланса углерода почв на кормовых угодьях России // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 4. С. 96-104.
186. Романовская А.А., Коротков В.Н., Смирнов Н.С., Карабань Р.Т., Трунов А.А. Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000-2011 гг. // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 5-18.
187. Романовская А.А., Федеричи С. Квота на выбросы и роль лесного сектора в национальных обязательствах Российской Федерации в новом климатическом соглашении // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 1. С. 20-38.
188. Руководство по описанию почв. – Рим: ФАО, 2012. – 101 с.
189. Русский чернозем. 100 лет после В.В. Докучаева // Розов Н.Н., Самойлова Е.М., Полупан Н.И. – М.: Наука, 1983. – 304 с.

190. Сапожникова С.А. Агроклиматические ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 9 с.
191. Сапронов Д.В. Многолетняя динамика эмиссии CO₂ из серых лесных и дерново-подзолистых почв. – Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. – Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2008. – 20 с.
192. Сапронов Д.В., Кузяков Я.В. Разделение корневого и микробного дыхания: сравнение трех методов // Почвоведение. 2007. № 7. С. 862-872.
193. Семенов А.В., Кузнецова Т.В., Степанов А.Л., Семенов В.М. Влияние азотного удобрения и растительных остатков на поведение метана в серой лесной почве // Агрохимия. 2004. № 4. С. 5–12.
194. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
195. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Тулина А.С. Стабилизация органического вещества в почве // Агрохимия. 2009. № 10. С. 77-96.
196. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Ходжаева А.К., Семенова Н.А., Кудеяров В.Н. Почвенная эмиссия закиси азота: влияние природных и агрогенных факторов // Агрохимия. 2004. № 1. С. 30-39.
197. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53-63.
198. Смагин А.В. Газовая функция почв // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1211–1223.
199. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А. Абиотические факторы дыхания почв // Экологический вестник Северного Кавказа. 2010. Т. 6. № 1. С. 5-13.
200. Смирнов Б.М. Энергетический баланс Земли и атмосферы // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 4. С. 9-17.
201. Смольянинов В.М., Стародубцев П.П. Комплексная мелиорация и орошение земель в Центрально-Черноземном регионе: Состояние, условия развития. –

Воронеж: Истоки, 2011. – 179 с.

202. Солодянкина С.В., Черкашин А.К. Геоинформационный анализ и моделирование геосистемных функций накопления углеродного запаса горно-таежными лесами Прибайкалья в изменяющейся природной среде // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9. Вып. 1. С. 44-55.

203. Солодянкина С.В., Черкашин А.К. Экономическая ГИС-оценка растительного потенциала нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа в ландшафтах юга Восточной Сибири // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. Т. 12. Вып. 2. С. 99-108.

204. Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 01.08.2018 г.).

205. Справочник агрохимика / Сост. Кореньков Д.А. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 350 с.

206. Степанов А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. – М.: ГЕОС, 2011. – 192 с.

207. Стольникова Е.В. Микробная биомасса, ее структура и продуцирование парниковых газов почвами разного землепользования. – Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.03. – Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2010. – 182 с.

208. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Васенев В.И., Саржанов Д.А. Микробное дыхание почвы в полевых и лабораторных условиях // Агрофизика. 2016. № 4. С. 17-23.

209. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2005. – 232 с.

210. Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биогеохимических циклов углерода и азота. – Автореф. дисс. ... д-ра. физ.-мат. наук в форме научного доклада: 03.00.16. – М.: Вычислительный центр АН СССР, 1992. – 47 с.

211. Тарко А.М. Модель биогеохимического цикла углерода и азота в лесной экосистеме // Регуляторная роль почвы в функционировании таежных экосистем. – М.: Наука, 2002. – С. 215–226.

212. Тембо А., Самарджич М., Васенев В.И., Рыжков О.В., Морев Д.В., Васенев И.И. Анализ основных факторов, влияющих на почвенную эмиссию углекислого газа черноземами Стрелецкой степи // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12864>.
213. Технология применения удобрений в севооборотах и организация их хранения / Сост. Кротких Т.А., Михайлова Л.А. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. – 29 с.
214. Типовые технологические карты возделывания и уборки колосовых культур / ВНИИ механизации сельского хозяйства РАСХН. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
215. Титлянова А.А., Чупрова В.В. Изменение круговорота углерода в связи с различным использованием земель (на примере Красноярского края) // Почвоведение. 2003. № 2. С. 211-219.
216. Тэйл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. – М.: Статистика, 1977. – 282 с.
217. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии: Учение о почвенном гумусе. – М.-Л.: Сельхозгиз, 1937. – 285 с.
218. Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс. – М.: Научный консультант, 2017. – 82 с.
219. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. – М.: Наука, 1982. – 203 с.
220. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Глобальные изменения климата и цикличность вулканической активности. – Burgas, Science without borders, 2008. – 301 с.
221. Хохлов В.Г. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области. – Автореф. дис... канд. с.-х. наук: 06.01.03. – М.: ТСХА, 1980. – 16 с.
222. Цыбулько Н.Н., Шапшеева Т.П., Арастович Т.В., Зайцев А.А. Минерализационная способность органического вещества торфяных почв и поступление ^{137}Cs в многолетние злаковые травы // Мелиорация. 2010. № 2 (60). С. 109-122.

223. Цыгуткин А.С. Оптимизация азотного питания озимой пшеницы, возделываемой в условиях Центрального района Нечерноземной зоны. – Автореф. дис. ...канд. биол. наук: 06.01.04. – М.: ВНИИ удобрений и агропочвоведения, 1997. – 16 с.
224. Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Курбатова Ю.А., Парфенова Е.И., Валентини Р., Верховец С.В., Ваганов Е.А., Шульце Е.Д. Энерго-массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность // Известия РАН. Серия биологическая. 2014. № 1. С. 65-75.
225. Черкасов Г.Н. Шутов Е.В., Пыхтин И.Г. Регистр технологий возделывания яровых зерновых культур для условий Центрально-Черноземного региона – Курск: ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии РАСХН, 2008. – 88 с.
226. Черкашин А.К., Бибаева А.Ю. Пейзаж как отображение функционально-динамических свойств ландшафта // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 157-165.
227. Чернышева Л.С., Платонова В.А., Примачев Е.В. Динамика термических условий разных полугодий в умеренных широтах Азии // Географический вестник. 2014. № 1 (28). С. 79-93.
228. Чертов О.Г., Комаров А.С. Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. 2013. № 8. С. 937-946.
229. Чертов О.Г., Надпорожская М.А. Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 391-399.
230. Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д. Особенности эмиссии углекислого газа из мучнистокарбонатных черноземов Тугнуйской котловины Забайкалья // Агрехимия. 2010. № 11. С. 45-49.
231. Чистотин М.В., Сафонов А.Ф. Динамика дыхания агродерново-подзолистой почвы в зависимости от содержания органического вещества и

- метеорологических факторов // Проблемы агрохимии и экологии. 2016. № 3. С. 52-58.
232. Чистотин М.В., Хайдуков К.П., Сафонов А.Ф. Связь между пространственной вариацией поток С-содержащих газов и свойствами почвы Длительного опыта ТСХА // Известия ТСХА. 2012. № 3. С. 27-35.
233. Чумаков В.Н. Формирование технико-экономических нормативов оснащения машинно-технологических станций средствами механизации земледелия – Автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. – СПб.: С.-Петербург. гос. аграр. ун-т., 2003. – 18 с.
234. Чупрова В.В. Минерализуемый пул органического вещества в агрочерноземах юга Средней Сибири // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 9. С. 83-89.
235. Шанин В.Н., Михайлов А.В., Быховец С.С., Комаров А.С. Глобальные изменения климата и баланс углерода в лесных экосистемах бореальной зоны: имитационное моделирование как инструмент прогноза // Известия РАН. Серия биологическая. 2010. № 6. С. 719-730.
236. Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.Н., Шепелев А.Г. Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 4. С. 473-479.
237. Шевцов Н.М. Влияние различных природных и антропогенных мероприятий на накопление углерода (и других элементов минерального питания растений) в почвах современного богарного и орошаемого земледелия // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. 2015. № 9. С. 27-42.
238. Шевченко В.А. Технология производства продукции растениеводства. – М.: Агропромиздат, 2002. – 164 с.
239. Шихова Л.Н., Лисицын Е.М. Динамика содержания и запасов углерода гумуса в пахотных подзолистых почвах подзоны южной тайги Кировской области // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2014. № 6-

2. С. 7-13.

240. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123-132.

241. Якименко В.Н. Изменение содержания форм минерального азота и калия в профиле почвы агроценозов // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 328. С. 202-207.

242. Янов В.И. Урожайность и питательная ценность видов полыни, перспективы их практического использования в условиях северо-западной части Прикаспия // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. Материалы VIII Международного симпозиума. Т. 3. – М.: РУДН, 2009. – С. 317-325.

243. Abbas F. A simple approach to estimate soil organic carbon and soil CO₂ emission // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. 2013. V. 32. No. 1. P. 9-18.

244. Abdalla M., Kumar S., Jones M., Burke J., Williams M. Testing DNDC model for simulating soil respiration and assessing the effects of climate change on the CO₂ gas flux from Irish agriculture // Global and Planetary Change. 2011. No. 78 (3-4). P. 106-115.

245. Abdalla M., Saunders M., Hastings A., Williams M., Smith P., Osborne B., Lanigan G., Jones M.B. Simulating the impacts of land use in Northwest Europe on Net Ecosystem Exchange (NEE): The role of arable ecosystems, grasslands and forest plantations in climate change mitigation // Science of the Total Environment. 2013. No. 465. P. 325-336.

246. Abohassan R.A. Carbon dynamics in a temperate agroforestry system in Southern Ontario, Canada. PhD thesis – University of Guelph, Canada, 2004. – 122 p.

247. Anderson T.R., Ryabchenko V.A., Fasham M.J.R., Gorchakov V.A. Denitrification in the Arabian Sea: a 3D ecosystem modelling study // Deep-Sea Research. Part I. 2007. V. 54. P. 2082–2119.

248. Ayres R.U., Schlesinger W.H., Socolow R.H. Human impacts on the carbon and nitrogen cycles // Industrial ecology and global change. Eds. Socolow R., Andrews F.,

- Berkhout F., Thomas V. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994. – P. 121-155.
249. Babu Y.J., Li C., Nayak D.R., Datta A., Adhya T.K. Modeling of methane emissions from rice-based production systems in India with the denitrification and decomposition model: Field validation and sensitivity analysis // *Current Science*. 2005. V. 89. No. 11. P. 1904-1912.
250. Balashov E., Buchkina N., Rizhiya E., Farkas C.S. Field validation of DNDC and SWAP models for temperature and water content of loamy and sandy loam spodosols // *International agrophysics*. 2014. V. 28. No. 2. P. 133-142.
251. Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. N₂O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model // *Folia Oecologica*. 2010. V. 37. No. 1. P. 8-15.
252. Baldioli M., Engel T., Klöcking B., Priesack E., Schaaf T., Sperr C., Wang E., Expert-N, ein Baukasten zur. Simulation der Stickstoffdynamik in Boden und Pflanze. – München: Freising, 1994. – 106 p.
253. Bardgett R.D. Plant-soil interactions in a changing world // *Biology Reports*. 2011. V. 3 (1). No. 16. URL: <https://f1000.com/prime/reports/b/3/16/>.
254. Batjes N.H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks // *Geoderma*. 2016. No. 269. P. 61-68.
255. Beheydt D., Boeckx P., Li C., van Cleemput O. Validation of DNDC for 22 long-term N₂O field emission measurements // *Atmospheric Environment*. 2007. V. 41. No. 29. P. 6196-6211.
256. Biasi C., Pitkämäki A.S., Tavi N.M., Koponen H.T., Martikainen P.J. An isotope approach based on ¹³C pulse-chase labelling vs. the root trenching method to separate heterotrophic and autotrophic respiration in cultivated peatlands // *Boreal Environment Research*. 2012. V. 17. No. 3-4. P. 184–192.
257. Blagodatsky S.A., Richter O. Microbial growth in soil and nitrogen turnover: a theoretical model considering the activity state of microorganisms // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. V. 30. No. 13. P. 1743-1755.
258. Blagodatsky S.A., Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Richter J. Microbial

- growth in soil and nitrogen turnover: model calibration with laboratory data // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. V. 30. No. 13. P. 1757-1764.
259. Bolan N.S., Saggar S., Luo J., Bhandral R., Singh J. Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modeling, environmental implications, and mitigation // *Advances in agronomy*. Eds. Sparks D.L. – San Diego USA: Elsevier, 2004. V. 84. P. 38-120.
260. Bond–Lamberty B., Thompson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // *Nature*. 2010. V. 464. P. 579-582.
261. Bouwman A.F. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 1996. No. 46. P. 53–70.
262. Bowen I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface // *Physical Review Journals*. 1926. V. 27. Is. 6. P. 779-787.
263. Bowen ratio instrumentation. Instruction manual. – Logan, USA: Campbell Scientific, 2005. – 36 p.
264. Burns R.C., Hardy R.W.F. Nitrogen fixation in bacteria and higher plants. – N.Y.: Springer Verlag, 1975. – 120 p.
265. Cai Z.T., Sawamoto T., Li C., Kang G., Boonjawat J., Mosier A., Wassman R., Tsuruta H. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emission in East Asia cropping system // *Global Biochemistry Cycles*. 2003. V. 17. No. 4. 1107. doi: 10.1029/2003GB002046. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GB002046>
266. Cantelaube P., Terres J.M. Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe // *Tellus*. 2005. V. 57. No. 3. P. 476-487.
267. Cao M., Dent J.B., Heal O.W. Modeling methane emissions from rice paddies // *Global Biogeochemistry Cycles*. 1995. No. 9. P. 193–195.
268. Castaldi S. Responses of nitrous oxide, dinitrogen consumption to temperature in forest and agricultural light textured soils determined by model experiment // *Biology and Fertility of Soils*. 2000. V. 32. No. 2. P. 67–72.
269. Castro M.S., Steudler P.A., Melillo J.M., Aber J.D., Bowden R.D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils // *Global*

Biogeochemistry Cycles. 1995. V. 9. No. 1. P. 1–10.

270. Ceglar A., Kajfež-Bogataj L. Simulation of maize yield in current and changed climatic conditions: addressing modelling uncertainties and the importance of bias correction in climate model simulations // *European Journal of Agronomy*. 2012. V. 37. Is. 1. P. 83–95.

271. Chaban B., Ng S.Y.M., Jarrell K.F. Archaeal habitats – from the extreme to the ordinary // *Canadian Journal of Microbiology*. 2006. V. 52. No. 2. P. 73–116.

272. Chapuis-Lardy L., Wrage N., Metay A., Chotte J.L., Bernoux M. Soils, a sink for N₂O: A review // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. No. 1. P. 1–17.

273. Chen C., Chen D., Pan J., Lam S.K. Application of the denitrification-decomposition model to predict carbon dioxide emissions under alternative straw retention methods // *Scientific World Journal*. 2013. No. 25. P. 851-901. doi: 10.1155/2013/851901.

274. Chen S., Zou J., Hu Z., Chen H., Lu Y. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2014. No. 198-199. P. 335-346.

275. Chen X., Dhungel J., Bhattarai S.P., Torabi M., Pendergast L., Midmore D.J. Impact of oxygenation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species // *Journal of Plant Ecology*. 2010. V. 4. Is. 4. P. 236-248.

276. Cherkashin A.K., Bibaeva A.Yu. Symmetry and transformation of microclimatic processes // *Russian meteorology and hydrology*. 2014. V. 39. No. 3. P. 152-158.

277. Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnic P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M. Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterization of the soil food web biota activity // *Ecological modelling*. 2017. V. 345. P. 125-139.

278. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Korschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // *Geoderma*. 1997. V. 81. No.1–2. P. 29-44.

279. Conrad R. Microbiological and biochemical background of production and consumption of NO and N₂O in soil. / Trace gas exchange in forest ecosystems. Eds.

- Gasche R., Papen H., Rennenberg H. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 3-33.
280. Conrad R. Quantification of methanogenic pathways using stable carbon isotopic signatures, a review and a proposal // *Organic Geochemistry*. 2005. V. 36. No. 5. P. 739–752.
281. Conrad R. Soil Microorganisms as Controllers of Atmospheric Trace Gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO) // *Microbiological Reviews*. 1996. V. 60. No. 4. P. 609–640.
282. Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. Modelling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system // *Meteorology at the millennium*. – N.Y.: Academic Press, 2001. – P. 259–279.
283. Cramer W., Bondeau A., Woodward F.I., Prentice I.C., Betts R.A., Brovkin V., Cox P.M., Fisher V., Foley J.A., Friend A.D., Kucharik C., Lomas M.R., Ramankutty N., Sitch S., Smith B., White A., Young-Molling C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models // *Global change biology*. 2001. V. 7. No. 4. P. 357-373.
284. Cui J., Li C., Sun G., Trettin C. Linkage of MIKE SHE to Wetland-DNDC for carbon budgeting and anaerobic biogeochemistry simulation // *Biogeochemistry*. 2005. V. 72. No. 2. P. 147-167.
285. Cui J., Li C., Trettin C. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model // *Global Change Biology*. 2004. No. 11. P. 278-289.
286. Da Costa J.M.N. Respiratory releases of carbon dioxide by aerial parts and roots of field-grown alfalfa and soybeans. PhD thesis. – Lincoln: The University of Nebraska, 1983. – 125 p.
287. Dalal R.C., Allen D.E., Livesley S.J., Richards G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review // *Plant and Soil*. 2008. V. 309. No. 1–2. P. 43–76.
288. Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀ // *Global Change Biology*. 2006. No. 12. P.

154–164.

289. Del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Ojima D.S., Kulmala A.E., Phongpan S. General model for N₂O and N₂ gas emissions from soils due to denitrification // *Global Biogeochemical Cycles*. 2000. No. 14. P. 1045–1060.
290. Deng J., Li C., Frohling S., Zhang Y., Bäckstrand K., Crill P. Assessing effects of permafrost thaw on C fluxes based on multiyear modeling across a permafrost thaw gradient at Stordalen, Sweden // *Biogeosciences*. 2014. No. 11. P. 4753–4770.
291. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M.F. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATs) for NCAR community climate model. – NCAR Technical Note, TN275+STR, 1986. – 69 p.
292. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // *Biogeosciences*. 2012. No. 9. P. 5323-5340.
293. Dugas W.A. Micrometeorological and chamber measurements of CO₂ flux from bare soil // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1993. No. 67. P.115-128.
294. Dunfield P., Knowles R. Kinetic of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol // *Applied and Environmental Microbiology*. 1995. V. 61. No. 8. P. 3125–3135.
295. Dutta B., Smith W.N., Grant B.B., Pattey E., Desjardins R.L., Li C. Model development in DNDC for the prediction of evapotranspiration and water use in temperate field cropping systems // *Environmental modelling & software*. 2016. V. 80. P. 9-25.
296. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Carbon cycle – climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // *Theoretical and Applied Climatology*. 2007. V. 89. No. 1–2. P. 9–24.
297. Elzen M., Beusen A., Rotmans J. Modelling global biogeochemical cycles an integrated assessment approach // RIVM report 461502007. – Bilthoven, the Netherlands: RIVM, 1995. – 104 p.

298. Elzen M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J. An integrated modeling approach to global carbon and nitrogen cycles: Balancing their budgets // *Global biogeochemical cycles*. 1997. V. 11. No 2. P. 191-215.
299. Estimation of emissions from agriculture. United Nations framework convention on climate change. FCCC/SBSTA/2004/INF.4. GE.04–61454. – Bonn: UNFCCC, 28 May 2004. – 20 p. – URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf04.pdf>.
300. FACCE-JPI projects booklet: FACCE ERA-NET Plus, MACSUR and Multi-partner call on GHG mitigation. – Brussels, Belgium: FACCE-JPI, 2017. – 42 p. – URL: https://www.facejpi.com/.../Projects+booklet_updated+08+...
301. FAO and ITPS. Status of the World's Soil Resources. Main report. – Rome: FAO, 2015. – 650 p.
302. Farahbakhshazad N., Dinnes D.L., Li C., Jaynes D.B., Salas W. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa // *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2008. V. 123. No. 1-3. P. 30-48.
303. Field C.B., Raupach M.R. The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world. – Washington: Island Press, 2004. – 526 p.
304. Follett R., Mooney S., Morgan J., Paustian K., Allen Jr. L.H., Archibeque S., Baker, J.M., Del Grosso S.J., Derner J., Dijkstra F., Franzluebbers A.J., Janzen H., Kurkalova L.A., McCarl B.A., Ogle S., Parton W.J., Peterson J.M., Rice C.W., Robertson G.P. Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in agriculture: challenges and opportunities. – Ames: Council for Agricultural Science and Technology (CAST), 2011. – 105 p.
305. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schultz M., Van Dorland R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing / Eds: Solomon S., Qin D., Manning M. et al. // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – P. 129–234.
306. Freibauer A., Kaltschmitt M. Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe // *Biogeochemistry*. 2003. No. 63. P. 93–115.

307. Friedlingstein P., Dufresne J.L., Cox P.M., Rayner P. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? // *Tellus*. 2003. V. 55B. No. 2. P. 692–700.
308. Frolking S., Li C., Braswell R., Fuglestvedt J. Short- and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies // *Global Change Biology*. 2004. V. 10. No. 7. P. 1180-1196.
309. Fumoto T., Kobayashi K., Li C., Yagi K., Hasegawa T. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes // *Global Change Biology*. 2008. V. 14. No. 2. P. 382-402.
310. Gao L., Jin Z., Huan Y. An optimizing decision-making system for rice culture. – Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
311. Gerber S., Hedin L.O., Oppenheimer M., Pacala S.W., Shevliakova E. Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model // *Global Biogeochemical Cycles*. 2010. V. 24. Is. 1. GB1001. doi: 10.1029/2008GB003336. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GB003336/epdf>
312. Gifford R.M. Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO₂ concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling // *Global Change Biology*. 1995. No. 1. P. 385-396.
313. Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L., Chadwick D., del Prado A., Li C., Misselbrook T., Rees R.M., Salas W., Sanz-Cobena A., Smith P., Tilston E.L., Topp C.F.E., Vetter S., Yeluripati J.B. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution // *Ecological modelling*. 2014. No. 292. P. 51-62.
314. Giltrap D.L., Li C., Saggar S. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2010. V. 136. No. 3-4. P. 292-300.
315. Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Svirezhev Yu.M. Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems // *Ecological Modelling*. 1998. V. 108. P. 265–276.
316. Golubyatnikov L.L., Svirezhev Yu.M. Life-cycle model of terrestrial carbon

- exchange // *Ecological Modelling*. 2008. V. 213. P. 202–208.
317. Gougoulas C., Clark J.M., Shaw L.J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2014. No. 94. P. 2362-2371.
318. GRAMP. Global Research Alliance Modeling Platform. URL: <http://gramp.org.uk/models/> (дата обращения 01.08.2018 г.).
319. Grant R.F., Pattey E. Modelling variability in N₂O emissions from fertilized agricultural fields // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. V. 35. No. 2. P. 225-243.
320. Greenland D.J. Land use and soil carbon in different agroecological zones // *Soil management and greenhouse effect*. Edited by Lal R., Kimble J., Levine E., Stewart B.A. – Boca Raton: CRC-Press. 1995. – P. 9-24
321. Guest G., Kröbel R., Grant B., Smith W., Sansoulet J., Pattey E., Desjardins R., Jégo G., Tremblay N., Tremblay G. Model comparison of soil processes in eastern Canada using DayCent, DNDC and STICS // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2017. V. 109. Is. 3. P. 211–232.
322. Hall A.J., Connor D.J., Whitfield D.M. Root respiration during grain filling in sunflower: the effect of water stress // *Plant and soil*. 1990. V. 121. Is. 1. P. 57-66.
323. Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48. No. 1. P. 115–146.
324. Haoa Y., Kanga X., Wua X., Cuia X., Liua W., Zhanga H., Lia Y., Wang Y., Xuc Z., Zhaoda H. Is frequency or amount of precipitation more important in controlling CO₂ fluxes in the 30-year-old fenced and the moderately grazed temperate steppe? // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. No. 171. P. 63– 71.
325. Helal H.M., Sauerbeck D. Short term determination of the actual respiration rate of intact plant roots // *Plant Roots and Their Environment*. Eds. McMichael B.L., Person H. – Amsterdam: Elsevier, 1991. – P. 88–92.
326. Held A.A., Steduto P., Orgaz F., Matista A., Hsiao T.C. Bowen ratio/energy balance technique for estimating crop net CO₂ assimilation, and comparison with a

- canopy chamber // *Theoretical and Applied Climatology*. 1990. No. 42. P. 203-213.
327. Hénault C., Devis X., Lucas J.L., Germon J.C. Influence of different agricultural practices (type of crop, form N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions // *Biology and Fertility of Soils*. 1998. V. 27. No. 3. P. 299–306.
328. Henckel T., Jäckel U., Schnell S., Conrad R. Molecular analyses of novel methanotrophic communities in forest soil that oxidize atmospheric methane // *Applied and Environmental Microbiology*. 2000. V. 66. No. 5. P. 1801–1808.
329. Houghton R.A. Balancing the global carbon budget // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2007. No. 35. P. 313-347.
330. Houghton R.A., House J.I., Pongratz J., van der Werf G.R., DeFries R.S., Hansen M.C., Le Quere C., Ramankutty N. Carbon emissions from land use and land-cover change // *Biogeosciences*. 2012. No. 9. P. 5125-5142.
331. Hsieh C.I., Leahy P., Kiely G., Li C. The effect of future climate perturbations on N₂O emissions from a fertilized humid grassland // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2005. V. 73. No. 1. P. 15-23.
332. Hunt H.W. A simulation model for decomposition in grasslands // *Ecology*. 1977. No. 58. P. 469-484.
333. Hütsch B.W. Methane oxidation in arable soils as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH // *Biology and Fertility of Soils*. 1998. V. 28. No. 1. P. 27–35.
334. IPCC, 1990: *Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment*. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I. J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, USA, Melbourne, Australia: IPCC, 1990.– 410 p.
335. IPCC, 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* / Eds. National Greenhouse Gas Inventories Programme, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Nगरा, K. Tanabe. – Japan, IGES: IPCC, 2006. – 20 p.
336. IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers / B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer

- (eds.). – New York, Cambridge: IPCC, 2007. – 23 p.
337. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. – 151 p.
338. ISMC. International Soil Modeling Consortium. URL: https://soil-modeling.org/copy_of_models (дата обращения 01.08.2018 г.).
339. Ito A. A global-scale simulation of the CO₂ exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere with a mechanistic model including stable carbon isotope, 1953-1999 // *Tellus*. 2003. V. 55B. P. 596-612.
340. Jain A., Yang X., Kheshgi H., McGuire A.D., Post W., Kicklighter D. Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2009. V. 23. GB4028. doi: 10.1029/2009GB003474. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GB003519>.
341. Jassal R., Black A., Novak M., Morgenstern K., Nesic Z., Gaumont-Guay D. Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2005. V. 130. No. 3–4. P. 176–192.
342. Jenkinson D.S., Adams D.E., Wild A. Model estimates of carbon dioxide emissions from soil in response to global warming // *Nature*. 1991. No. 351. P. 304-306.
343. Kammann C., Hepp S., Lenhart K., Müller C. Stimulation of methane consumption by endogenous CH₄ production in aerobic grassland soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2009. V. 41. No. 3. P. 622–629.
344. Kane D. Carbon sequestration potential on agricultural lands: a review of current science and available practices. – Washington: National Sustainable Agriculture Coalition, 2015. – 35 p.
345. Kang X., Hao Y., Cui X., Chen H., Li C., Rui Y., Tian J., Kardol P., Zhong L., Wang J., Wang Y. Effects of grazing on CO₂ balance in a semiarid steppe: field observations and modeling // *Journal of Soils and Sediments*. 2013. No. 13. P. 1012–1023.
346. Kaufman R.K., Stern D.I. Evidence for human influence on climate from

- hemispheric temperature relations // *Nature*. 1997. V. 388. No. 6637. P. 39-44.
347. Kesik M., Ambus P., Baritz R., Bruggemann N., Butterbach-Bahl K., Damm M., Duyzer J., Horvath L., Kiese R., Kitzler B., Leip A., Li C., Pihlatie M., Pilegaard K., Seufert G., Simpson D., Skiba U., Smiatek G., Vesala T., Zechmeister-Boltenstern S. Inventories of N₂O and NO emissions from European forest soils // *Biogeosciences*. 2005. No. 2. P. 353-375.
348. Kiese R., Li C., Hilbert D.W., Papen H., Butterbach-Bahl K. Regional application of PnET-N-DNDC for estimating the N₂O source strength of tropical rainforests in the Wet Tropics of Australia // *Global Change Biology*. 2005. V. 11. No. 1. P. 128-144.
349. Kirschbaum M.U.F., Mueller R. Net Ecosystem Exchange. – Australia: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, 2001. – 139 p.
350. Kishi M.J., Kashiwai M., Ware D.M., Megrey B.A., Eslinger D.L., Werner F.E., Noguchi-Aita M., Azumaya T., Fujii M., Hashimoto S., Huang D., Iizumi H., Ishida Y., Kang S., Kantakov G.A., Kim H.C., Komatsu K., Navrotsky V.V., Zvalinsky V.I. NEMURO – a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem // *Ecological Modelling*. 2007. V. 202. P. 12–25.
351. Klemedtsson Å.K., Klemedtsson L. Methane uptake in Swedish forest soil in relation to liming and extra N-deposition // *Biology and Fertility of Soils*. 1997. V. 25. No. 3. P. 296–301.
352. Köchy M., Hiederer R., Freibauer A. Global distribution of soil organic carbon - Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world // *Soil*. 2015. No. 1. P. 351-365.
353. Koerber G.R., Hill P.W., Edwards-Jones G., Jones D.L. Estimating the component of soil respiration not dependent on living plant roots: Comparison of the indirect y-intercept regression approach and direct bare plot approach // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. V. 42. Is. 10. P. 1835–1841.
354. Kolchugina T.P., Vinson T.S., Gaston G.G., Rozhkov V.A., Schlentner S.F. Carbon pools, fluxes, and sequestration potential in soil of the Former Soviet Union // *Soil Management and greenhouse effect*. Edited by Lal R., Kimble J., Levine E., Stewart B.A. – Lewis Publishers: Boca Raton, London, Tokyo, 1995. – P. 25-40.

355. Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 – a model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems // *Ecological Modelling*. 2003. V. 170. P. 373–392.
356. Krapivin V.F. Mathematical model for global ecological investigation // *Ecological Modelling*. 1993. V. 67. P. 103–127.
357. Kudeyarov V.N., Kurganova I.N. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates // *Eurasian Soil Science*. 2005. V. 38. No. 9. P. 983–992.
358. Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // *Biogeosciences*. 2008. No. 5. P. 969-980.
359. Kurbatova J., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A., Li C. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // *Environmental Research Letters*. 2009. V. 4. No. 4. P. 045022. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045022. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/4/4/045022/fulltext/>.
360. Kurganova I., De Gerenyu V.L., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russian // *Global Change Biology*. 2014. No. 20. P. 938-947.
361. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. V. 38. No. 3. P. 425–448.
362. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change // *Geoderma*. 2004. V. 123. Is. 1-2. P. 1-22. URL: doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
363. Larionova A.A., Sapronov D.V., Lopez de Gerenyu V.O., Kuznetsova L.G., Kudeyarov V.N. Contribution of plant root respiration to the CO₂ emission from soil // *Eurasian Soil Science*. 2006. V. 39. Is. 10. P. 1127–1135.
364. Le Mer J., Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review // *European Journal of Soil Biology*. 2001. V. 37. No. 1. P. 25–50.
365. Le Quéré C., Peters G. P., Andres R. J., Andrew R. M., Boden T. A., Ciais P., Friedlingstein P., Houghton R. A., Marland G., Moriarty R., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Arvanitis A., Bakker D. C. E., Bopp L., Canadell J. G., Chini L. P., Doney S. C., Harper A., Harris I., House J. I., Jain A. K., Jones S. D., Kato E., Keeling R. F., Klein

Goldewijk K., Körtzinger A., Koven C., Lefèvre N., Maignan F., Omar A., Ono T., Park G.-H., Pfeil B., Poulter B., Raupach M. R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Schwinger J., Segschneider J., Stocker B. D., Takahashi T., Tilbrook B., van Heuven S., Viovy N., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zaehle S. Global carbon budget 2013 // *Earth System Science Data*. 2014. No. 6. P. 235–263.

366. Lee K.-H., Jose S. Soil respiration and microbial biomass in a pecan - cotton alley cropping system in southern USA // *Agroforestry systems*. 2003. V. 58. No. 1. P. 45-54.

367. Leffelaar P.A., Wessel W.W. Denitrification in a homogeneous, closed system: experiment and simulation // *Soil Science*. 1988. V. 146. No. 5. P. 335-349.

368. Leip A., Marci G., Koeble R., Kempen M., Britz W., Li C. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe // *Biogeosciences*. 2008. No. 5. P. 73-94.

369. Li C. Modelling trace gas emission from agricultural ecosystems // *Nutrient Cycles in Agroecosystems*. 2000. V. 58. P. 259-276.

370. Li C., Aber J.D., Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development// *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105. No. D4. P. 4369-4384.

371. Li C., Cui J., Sun G., Trettin C. Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems // *Environmental Management*. 2004. V. 33. No. 1. P. 176-176.

372. Li C., Frolking S., Butterbach-Bahl K. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing // *Climatic Change*. 2005. V. 72. No. 3. P. 321-338. (a)

373. Li C., Frolking S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Korchens M., Poulton P.R. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model // *Geoderma*. 1997. No. 81. P. 45-60.

374. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // *Journal of geophysical research*. 1992. V. 97. No. D9. P. 9759-9776. (a)

375. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil

- driven by rainfall events: 2. Model applications // *Journal of geophysical research*. 1992. V. 97. No. D9. P. 9777-9783. (6)
376. Li C., Frolking S., Harriss R. Modelling carbon biogeochemistry in agricultural soils // *Global Biogeochemistry Cycles*. 1994. No 8. P. 237-254.
377. Li C., Frolking S., Xiao X., Moore III B., Boles S., Qiu J., Huang Y., Salas W., Sass R. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. V. 19. No. 3. GB3010. URL: doi.org/10.1029/2004GB002341. (6)
378. Li S., Li J., Li C., Huang S., Li X., Li S., Ma Y. Testing the RothC and DNDC models against long-term dynamics of soil organic carbon stock observed at cropping field soils in North China // *Soil and Tillage Research*. 2016. V. 163. P. 290-297.
379. Li C. Modeling soil organic carbon sequestration potential with modeling approach // *Simulation of Soil Organic Carbon Storage and Changes in Agricultural Cropland in China and Its Impact on Food Security*. – China Meteorological Press, 2008. – 14 c.
380. Li C. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2007. V. 53. No. 4. P. 344-352. (a)
381. Li C. Selenium deficiency and endemic heart failure in China: A case study of biogeochemistry for human health // *AMBIO*. 2007. V. 36. No. 1. P. 90-93. (6)
382. LI-COR. LI-8100A Automated soil CO₂ flux system. Survey, long-term, and multiplexed measurements. – USA: LI-COR, 2012. – 6 p. – URL: https://www.licor.com/env/pdf/soil_flux/8100A_brochure.pdf
383. Lin B.L., Sakoda A., Shibasaki R., Goto N., Suzuki M. Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems // *Ecological Modelling*. 2000. V. 135. P. 89–110.
384. Logofet D.O., Alexandrov G.A. Modelling of matter cycle in a mesotrophic bog ecosystem. II. Dynamic model and ecological succession // *Ecological Modelling*. 1983. V. 21. P. 259–276.

385. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N. Effect of soil temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analysis of a long-term field experiment // *Plant Soil Environment*. 2005. No. 51 (5). P. 213–219.
386. Lundegardh H. *Der kreislauf der kohlensäure in der natur*. – Jena: G. Fischer, 1924. – 308 p.
387. Luo Y., Zhou X. *Soil respiration and the environment*. – Burlington: Academic Press, 2006. – 316 p.
388. McGinn S.M., King K.M. Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO₂ fluxes above alfalfa and maize // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1990. No. 49. P. 331-349.
389. McGuire A.D., Sitch S., Clein J.S., Dargaville R., Esser G., Foley J., Heimann M., Joos F., Kaplan J., Kicklighter D.W., Meier R.A., Melillo J.M., Moore III B., Prentice I.C., Ramankutty N., Reichenau T., Schloss A., Tian H., Williams L.J., Wittenberg U. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2001. V. 15. P. 183–206.
390. Medinets S.V., Skiba U.M., Medinets V.I., Bilanchin YA. M., Pitsyk V.Z., Goshurenko L.M., Kotogura S.S. Changes in soil carbon and nitrogen dynamics during a three-year crop rotation on a chernozem soil in the Southern Ukraine // *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2014. Т. 19. № 2 (21). С. 143-165.
391. Miltner A., Kopinke F.D., Kindler R., Selesi D., Hartmann A., Kästner M. Non-phototrophic CO₂ fixation by soil microorganisms // *Plant and Soil*. 2005. V. 269. No. 1–2. P. 193–203.
392. Morell F.J., Whitmore A.P., Álvaro-Fuentes J., Lampurlanés J., Cantero-Martínez C. Root respiration of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: field and modelling approaches // *Plant and Soil*. 2012. V. 351. Is. 1. P. 135–147.
393. Morgan R.E., Weinberg R. Computer simulation of world systems: biogeochemical cycles // *International Journal of Environmental Studies*. 1972. V. 3. P.

105–118.

394. Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S., Van Cleemput O. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle // *Nutrient Cycling Agroecosystems*. 1998. V. 52. No. 2–3. P. 225–248.
395. Moyano F.E., Manzoni S., Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models // *Soil Biology & Biochemistry* 2013. No. 59. P. 72-85.
396. Müller C., Bondeau A., Popp A., Waha K., Fader M. Climate change impacts on agricultural yields: background note to the world development report. – Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2010. – 11 pp.
397. Muller T., Hoper H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model application // *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. V.36. № 6. P. 877–888.
398. Multilingual soil database. – Rome: FAO, ISRIC, CSIC, 1995. – 98 p.
399. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles // *Journal of hydrology*. 1970. V. 10. No. 3. P. 282-290.
400. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. URL: http://soils.usda.gov/technical/handbook/images/Part618Exhibit8_hi.jpg (дата обращения 01.08.2018 г.).
401. Neufeldt H., Schafer M., Angenendt E., Li C., Kaltschmitt M., Zeddies J. Disaggregated greenhouse gas emission inventories from agriculture via a coupled economic-ecosystem model // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2006. V. 112. No. 2-3. P. 233-240.
402. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. Interim report IR-00-021. – USA: NASA, International institute for applied systems analysis, 2000. URL: <https://ideas.repec.org/p/wop/iasawp/ir00021.html>.
403. O'Dell D., Sauer T.J., Hicks B.B., Lambert D.M., Smith D.R., Bruns W., Basson A., Marake M.V., Walker F., Wilcox M.D.Jr., Eash N.S. Bowen ratio energy balance

- measurement of carbon dioxide (CO₂) fluxes of no-till and conventional tillage agriculture in Lesotho // *Open Journal of Soil Science*. 2014. No. 4. P. 87-97.
404. Oettli P., Sultan B., Baron C., Vrac M. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? // *Environmental research letters*. 2011. V. 6. No. 1. 014008. doi:10.1088/1748-9326/6/1/014008. URL: http://agritrop.cirad.fr/559785/1/document_559785.pdf.
405. Parkin T.B., Kaspar T.C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implications for estimating soil carbon loss // *Soil Science Society of American Journal*. 2003. V. 67. No. 6. P. 1763–1772.
406. Parkin T.B., Kaspar T.C., Senwo Z., Prueger J.H., Hatfield J.L. Relationship of soil respiration to crop and landscape in the Walnut creek watershed // *Journal of Hydrometeorology*. 2005. V. 6. No. 6. P. 812-824.
407. Parton W.J., Scurlock J.M.D., Ojima D.S., Gilmanov T.G., Scholes R.J., Schimel D.S., Kirchner T., Menaut J.C., Seastedt T., Garcia Moya E., Kamnalrut A., Kinyamario J.L. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide // *Global Biogeochemistry Cycles*. 1993. V. 7. No. 4. P. 785–809.
408. Pathak H., Li C., Wassmann R. Greenhouse gas emissions from India rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model // *Biogeosciences*. 2005. V. 2. No. 2. C. 113-123.
409. Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M., Bakema A. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. – Pudoc: Wageningen, 1989. – 271 p.
410. Potter C.S., Matson P.A., Vitousek P.M., Davidson E.A. Process modeling of controls on nitrogen trace gas emissions from soil world-wide // *Journal of Geophysics Research*. 1996. No. 101. P. 1361–1377.
411. Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data // *Global Biogeochemistry Cycles*. 1993. V. 7. P. 811–841.
412. Priputina I., Zubkova E., Shanin V., Smirnov V., Komarov A. Evidence of plant

biodiversity changes as a result of nitrogen deposition in permanent pine forest plots in central Russia. *Ecoscience*. 2014. V. 21. Is. 3-4. P. 286-300.

413. Puhe J., Ulrich B. Global climate change and human impacts on forest ecosystems: Postglacial development, present situation and future trends in Central Europe. – USA: Springer Science & Business Media, 2012. – 592 c.

414. Qiu J., Li C., Wang L., Tang H., Li H., van Ranst E. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. V. 23. No. 1. GB1007. URL: <https://doi.org/10.1029/2008GB003180>.

415. Qiu J., Wang L., Tang H., Li H., Li C. Studies on the situation of soil organic carbon storage in croplands in northeast of China // *Agricultural Sciences in China*. 2005. No. 4 (1). P. 101-105.

416. Rachmilevitch S., Lambers H., Huang B. Root respiratory characteristics associated with plant adaptation to high soil temperature for geothermal and turf-type *Agrostis* species // *Journal of Experimental Botany*. 2006. V. 57. No. 3. P. 623–631.

417. Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9. P. 23-36.

418. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 // *Global Change Biology*. 2002. V. 8. P. 800-812.

419. Raich J.W., Rastetter E.B., Melillo J.M., Kicklighter d.W., Steudler P.A., Peterson B.J., Grace A.L., Moore III B., Vorosmarty C.J. Potential net primary productivity in South America: application of a global model // *Ecological Application*. 1991. V. 1. P. 399–429.

420. Rayment M.V. Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux // *Journal of Soil Science*. 2000. No. 51. P. 107-110.

421. Rees R.M., Bingham I.J., Baddeley J.A., Watson C.A. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems // *Geoderma*. 2005. V. 128. Is. 1–2. P. 130–154

422. Reichstein M., Katterer T., Andren O., Ciais P., Schulze E.-D., Cramer W., Papale D., Valentini R. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil

- organic matter pools: critique and outlook // *Biogeosciences*. 2005. No. 2. P. 317–321.
423. Report of the thirty-eighth meeting of the small-scale working group. – Bonn, Germany: CDM SSC WG, 2012. – 8 p.
424. Reuss J.O., Innis G.S. A grassland nitrogen flow simulation model // *Ecology*. 1977. V. 58. P. 379–388.
425. Roelandt C., Van Wesemael B., Rounsevell M. Estimating annual N₂O emissions from agricultural soils in temperate climates // *Global Change Biology*. 2005. No. 11. P. 1701–1711.
426. Rosenstock T.S., Rufino M.C., Butterbach-Bahl K., Wollenberg E., Richards M. Methods for measuring greenhouse gas balances and evaluating mitigation options in smallholder agriculture. – USA: Springer, 2016. – 202 p.
427. Roslev P., Iversen N., Henriksen K. Oxidation and assimilation of atmospheric methane by soil methane oxidizers // *Applied and Environmental Microbiology*. 1997. V. 63. No. 3. P. 874–880.
428. Ryabchenko V.A., Gorchakov V.A., Fasham M.J.R. Seasonal dynamics and biological productivity in the Arabian Sea euphotic zone as simulated by a three-dimensional ecosystem model // *Global Biogeochemical Cycles*. 1998. V. 12. P. 501–530.
429. Saaria A., Rinnan R., Martikainen P.J. Methane oxidation in boreal forest soils: kinetics and sensitivity to pH and ammonium // *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. V. 36. No. 7. P. 1037–1046.
430. Sadras V.O., Calderini D. Crop physiology: application for genetic improvements and agronomy. – Burlington, MA, USA: Academic Press, 2009. – 581 p.
431. Sagar S., Andrew R.M., Tate K.R., Hedley C.B., Rodda N.J., Townsend J.A. Modelling nitrous oxide from daily-grazed pastures // *Nutrient cycling in agroecosystems*. 2004. V. 68. No. 3. P. 243–255.
432. Sagar S., Giltrap D.L., Li C., Tate K.R. Modelling nitrous oxide emissions from grazed grasslands in New Zealand // *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2007. V. 119. No. 1–2. P. 205–216.
433. Šantrůčková H., Bird M.I., Elhottová D., Novák J., Píček T., Šimek M.,

- Tykva R. Heterotrophic fixation of CO₂ in soil // *Microbial Ecology*. 2005. V. 49. No. 2. P. 218–225.
434. Sarmiento J.L., Slater R.D., Fasham M.J.R., Ducklow H.W., Toggweiler J.R., Evans G.T. A seasonal three-dimensional ecosystem model of nitrogen cycling in the North Atlantic euphotic zone // *Global Biogeochemistry Cycles*. 1993. V. 7. P. 417–450.
435. Schimel J.P., Weintraub M.N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. V. 35. No. 4. P. 549-563.
436. Schlesinger W.H. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. – London: Academic Press, 1991. – 433 p.
437. Schwendenmann L., Pendal E. Response of organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation // *Biology and Fertility of Soils*. 2008. V. 44. No. 8. P. 1053–1062.
438. Scott R.L., Hamerlynck E.P., Jenerette G.D., Moran M.S., Barron-Gafford G.A. Carbon dioxide exchange in a semidesert grassland through drought-induced vegetation change // *Journal of geophysical research*. 2010. V. 115. Is. G3. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JG001348/epdf>.
439. Scurlock J.M.O, Cramer W., Olson R.J., Parton W.J., Prince S.D. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation // *Ecological Application*. 1999. No. 9. P. 913-919.
440. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1986. No. 43 (6). P. 505–531.
441. Shangguan W., Dai Y., Duan Q., Liu B., Yuan H. A global soil data set for earth system modeling // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2014. No. 6. P. 249-263.
442. Shi P.L., Zhang X.Z., Zhong Z.M., Ouyang H. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006. V. 137. Is. 3–4. P. 220–233.

443. Shimmel S.M. Dark fixation of carbon dioxide in an agricultural soil // *Soil Science*. 1987. V. 144. No. 1. P. 20–23.
444. Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I. Bottom-up inventory of the carbon fluxes in Northern Eurasia for comparison with GOSAT Level 4 Products. – Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2010. – 225 p.
445. Sitaula B.K., Bakken L.R., Abraxamsen G. CH₄ uptake by temperate forest soils: effect of N input and soil acidification // *Soil Biology and Biochemistry*. 1995. V. 27. No. 7. P. 871–880.
446. Smith J., Smith P., Wattenbach M., Gottschalk P., Romanenkov V.A., Shevtsova L.K., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Romanenko I.A., Lisovoy N.V. projected changes in the organic carbon stocks of croplands mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990-2070 // *Global Change Biology*. 2007. No. 13. P. 342-354.
447. Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill W.B., Arah J.R.M., Chertov O.G., Coleman K., Franko U., Frolking S., Jenkinson D.S., Jensen L.S., Kelly R.H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A.S., Li C., Molina J.A.E., Mueller T., Parton W.J., Thornley J.H.M., Whitmore A.P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments // *Geoderma*. 1997. No. 81. P. 153-225.
448. Sokolov A.P., Kicklighter D.W., Melillo J.M., Felzer B.S., Schlosser C.A., Cronin T.W. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle // *Journal of Climate*. 2008. V. 21. No. 15. P. 3776–3796.
449. StatSoft. Электронный учебник по статистике – М.: StatSoft, 2012. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/> (дата обращения 01.08.2018).
450. Suleau M., Moureaux C., Dufranne D., Buysse P., Bodson B., Destain J.P., Heinesch B., Debacq A., Aubinet M. Respiration of three Belgian crops: Partitioning of total ecosystem respiration in its heterotrophic, above- and below-ground autotrophic components // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2011. V. 151. Is. 5. P. 633–643.
451. Sun W.J., Huang Y., Chen S.T., Yang Z.F., Zheng X.H. CO₂ emission from soil-

- crop system as influenced by crop growth and tissue N content // *Environmental Science*. 2004. No. 25 (3). P. 1-6. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15327243>
452. Sutton W.R., Srivastava J.P., Neumann J.E., Droogers P., Boehlert B.B. Reducing the vulnerability of Uzbekistan's agricultural systems to climate change. Impact assessment and adaptation options. – Washington: The World Bank, 2013. – 124 p.
453. Swinnen J. Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil // *Plant and Soil*. 1994. V. 165. No. 1. P. 89–101.
454. Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global biogeochemical cycles*. 2009. V. 23. Is. 2. URL: doi.org/10.1029/2008GB003327.
455. Tazhibayeva K., Townsend R. The impact of climate change on rice yields: heterogeneity and uncertainty. Working Paper – Cambridge, 2012. – 47 p. – URL: http://www.robertmtownsend.net/sites/default/files/files/papers/working_papers/Impact_of_Climate_Change_on_Rice_Yields_Dec_2012.pdf.
456. The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world / Eds. Field Ch.B. and Raupach M.R. SCOPE 62. – Washington: Island Press, 2003. – 519 p.
457. The global carbon project. 2017. URL: <http://www.globalcarbonproject.org/index.htm> (дата обращения 01.08.2018 г.).
458. Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K., Moore J.K., Mahowald N., Randerson J.T., Fung I., Lamarque J.F., Feddes J.J., Lee Y.H. Carbon-nitrogen interactions regulate climate–carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere–ocean general circulation model // *Biogeosciences*. 2009. No 6. P. 2099–2120.
459. Thornton P.E., Lamarque J.F., Rosenbloom N.A., Mahowald N.M. Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO₂ fertilization and climate variability // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2007. V. 21. Is. 4. GB4018. URL: doi.org/10.1029/2006GB002868
460. Tian H., Lu C., Ciais P., Michalak A.M., Canadell J.G., Saikawa E., Huntzinger D.N., Gurney K.R., Sitch S., Zhang B., Yang J., Bousquet P., Bruhwiler L., Chen G., Dlugokencky E., Friedlingstein P., Melillo J., Pan S., Poulter B., Prinn R., Saunois M.,

- Schwalm C.R., Wofsy S.C. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere // *Nature*. 2016. V. 531. P. 225–228.
461. Tonitto C., David M.B., Drinkwater L.E., Li C. Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: model calibration, validation, and uncertainty analysis // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2007. V. 78. No. 1. P. 51-63. (a)
462. Tonitto C., David M.B., Li C., Drinkwater L.E. Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: model comparison of conventional and diversified rotations // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2007. V. 78. No. 1. P. 65-81. (б)
463. Tonitto C., Powell T.M. Development of a spatial terrestrial nitrogen model for application to Douglas-fir forest ecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. V. 193. P. 340–362.
464. Tsuji G.Y, Uehara G., Balas S. DSSAT v3. – Honolulu: University of Hawaii, 1994. – 661 p.
465. User friendly manual of the EX-Ante Carbon-balance Tool (EX-ACT). Estimating and targeting greenhouse gas mitigation in agriculture, livestock, forestry and land use projects. – Rome: FAO, 2013. – 141 p.
466. User’s guide for the DNDC model. Version 9.5. – USA: University of New Hampshire, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, 2012. – 104 p.
467. Venevsky S.V. A set of biogeochemical model approaches for integrated modeling of climate change impacts. Biospheric carbon and nitrogen cycles. – Laxenburg: IIASA, 1994. – 26 p.
468. Venterea R.T. Nitrite-driven nitrous oxide production under aerobic soil conditions: kinetics and biochemical controls // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. No. 13. P. 1798–1809.
469. Vitousek P.M., Howarth R.W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? // *Biogeochemistry*. 1991. V. 13. P. 87–115.
470. Wang L., Qiu J., Tang H., Li H., Li C., van Ranst E. Modeling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China // *Geoderma*. 2008. V. 147. No. 1-2. P. 47-55.

471. Wang M., Wang Y. Using a modified DNDC model to estimate N₂O fluxes from semi-arid grassland in China // *Soil biology and biochemistry*. 2003. V. 35. No 4. P. 615-620.
472. Wania R., Meissner K.J., M. Eby M., Arora V.K., Ross I., Weaver A.J. Carbon-nitrogen feedbacks in the UVic ESCM // *Geoscientific Model Development*. 2012. V. 5. P. 1137–1160.
473. Ward J.H.Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *Journal of the American statistical association*. 1963. No. 58. P. 236–244.
474. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2017. No. 13. – 8 p.
475. Wrage N., Velthof G.L., van Beusichem M.L., Oenema O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide // *Soil Biology and Biochemistry*. 2001. V. 33. No. 12–13. P. 1723–1732.
476. Xu-Ri, Prentice I.C. Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model // *Global Change Biology*. 2008. V. 14. No. 8. P. 1745–1764.
477. Yadav D., Wang J. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada // *Environmental Pollution*. 2017. No. 230. P. 1040-1049. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.066.
478. Yu K., Struwe S., Kjøller A., Chen G. Nitrous oxide production and consumption potential in an agricultural and a forest soil // *Communications in Soil Sciences and Plant Analysis*. 2008. V. 39. No. 15. P. 2205–2220.
479. Yu Y., Zhao C. Modelling soil and root respiration in a cotton field using the DNDC model // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2015. V. 178. Is. 5. P. 787-791.
480. Zaehle S., Friend A.D. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2010. V. 24. Is. 1. GB1005. URL: doi.org/10.1029/2009GB003521.
481. Zavalishin N.N. Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems // *Ecological Modelling*. 2008. V. 213. P. 16–32.
482. Zhang Y., Li C., Zhou X., Moore B. A simulation model linking crop grows and

soil biogeochemistry for sustainable agriculture // Ecological modelling. 2002. V. 151. Is. 1. P. 75-108.

483. Zhao Y., Xue Z., Guo H., Mu X., Li C. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2004. V. 30. No. 19. P. 155-165.

484. Zhuang Y., Zhang H., Wang X., Li C. Emission inventory of carbon-containing greenhouse gases in China and technological measures for their abatement // Chinese Journal of Population, Resources and Environment. 2004. V. 2. No. 3. P. 7-13.