

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Суховеевой Ольги Эдуардовны

«Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ в агроландшафтах

Европейской территории России на основе имитационного моделирования»,

представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности

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

Диссертация О.Э. Суховеевой посвящена решению оригинальной задачи – проверке адекватности использования разработанной за рубежом и рекомендованной РКИК ООН и ФАО для оценки баланса углерода и эмиссии парниковых газов модели и основанного на ней программного продукта для расчета потоков CO₂ в агроландшафтах Европейской территории России и дополнительно на полупустынных пастбищах Узбекистана. Диссертационная работа объемом 209 страниц содержит результаты самостоятельного исследования автором динамики потоков CO₂ с учетом влияния на них внешних факторов и условий различных почвенно-климатических зон на основе имитационного и статистического моделирования. Работа призвана подготовить методическую базу для понимания причин факторного видоизменения потоков CO₂ вследствие сельскохозяйственного использования земель и для разработки возможных управляющих действий.

Актуальность проблемы связана с тем, что диоксид углерода (углекислый газ, CO₂) является ведущим биогенным химическим агентом, участвующим в круговороте углерода и важнейшим фактором климатических изменений. Антропогенная трансформация естественных ландшафтов затрагивает геохимические процессы в почве, поскольку часть природных источников и стоков CO₂ переводится в антропогенные, величину которой необходимо оценить.

В физической географии и геохимии ландшафтов для решения такой задачи применяются методы натурных стационарных исследований и мониторинга, а также математического моделирования, вычислительного экспериментирования. В связи с необходимостью снижения эмиссии CO₂, возникшей в результате сельскохозяйственного использования земель, возникает потребность в создании и применении единого аппарата оценки зависимости потоков CO₂ от природных и антропогенных факторов на региональном уровне.

В качестве такого аппарата предлагается применить программу DNDC (DeNitrification-DeComposition) – реализацию процессно-ориентированной имитационной модели оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода и азота, в том числе биогенных парниковых газов, в почвах сельскохозяйственного назначения. Это единственная имитационная модель данного типа, которая широко применяется для инвентаризации парниковых газов на государственном уровне и в практике исследований в разных странах. Есть опыт апробации модели DNDC для ландшафтов территории России.

В этих исследованиях необходим географический подход, дающий возможность принять во внимание в расчетных алгоритмах особенности природной среды, например, в таких показателях как бонитеты древостоя или почвы, устойчивые характеристики типов географических систем. Необходимо «погрузить» модель в реальную среду и проследить, как она реагирует на пространственное и временное варьирование факторов и условий и сравнить эту реакцию с реальными изменениями в различных ландшафтных обстановках. Такие процедуры полезны для совершенствования методов сравнительно-географического анализа соответствующих проблем.

В работе определен **объект исследования** – агроландшафты, используемые в качестве пашен. **Предметом** диссертационного исследования являются основные потоки CO₂ в наземных ландшафтах: эмиссия CO₂ из почвы (почвенное дыхание), баланс CO₂ в экосистеме (чистый экосистемный обмен).

Задачи исследования, поставленные автором, следующие: 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 факторов и условий на потоки CO₂ в агроландшафтах на Европейской

территории России; 4) проанализировать пространственно-временную динамику потоков CO_2 в различных типах агроландшафтов Европейской части страны.

Содержащиеся в работе научные положения, выводы и рекомендации обладают признаками научной новизны. **Новизна диссертационной работы** состоит в следующем: 1) разработан алгоритм применения имитационной модели DNDC для оценки потоков CO_2 в агроландшафтах на территории России и Узбекистана, включающий коррекцию ее внутренних настроек и параметров в соответствии с факторами и условиями участков территории 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 CO_2 , апробированная для шести вариантов агроландшафтов с влиянием разных антропогенных факторов, ранжированных по степени сложности их воздействия на почвенные процессы; 4) дан прогноз увеличения потоков CO_2 в агроландшафтах в ответ на повышение его атмосферной концентрации, обеспечивающих нулевой баланс органического углерода в пахотных почвах Европейской территории России; 5) с учетом изменения значений 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.

Индивидуальный вклад автора, на наш взгляд, включает следующее: 1) созданы базы данных климатических факторов и условий Российского Нечерноземья, а также характеристик почвенного и растительного покрова агроландшафтов; 2) подготовлена информационная основа для корректировки внутренних настроек модели DNDC с целью ее адаптации и верификации для пахотных почв России и пастбищ Узбекистана; 3) проведен расчет потоков CO_2 и оценена эффективность моделирования при различных почвенно-климатических условиях и типах землепользования на основе статистического и имитационного подходов.

Теоретическая значимость полученных результатов, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их **научная достоверность** подтверждаются: 1) полнотой ознакомления и использования в работе основных концепций отечественных и зарубежных ученых по вопросам изучаемой проблемы (при ее подготовке проанализировано 484 литературных источника, в том числе 242 публикации на английском языке); 2) результатами измерений необходимых для верификации модели показателей в трех полевых опытах, проводившихся квалифицированными исследователями с помощью современного оборудования; 3) использованием пяти статистических критериев оценки эффективности и достоверности моделирования по созданной методике применения DNDC в России; 4) согласованностью полученных выводов диссертационного исследования с существующими представлениями об особенностях динамики потоков CO_2 в агроландшафтах; 5) обсуждением полученных результатов на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях, публикациями в рецензируемых научных изданиях.

С практической точки зрения, разработанная процедура оценки потоков CO_2 будет способствовать совершенствованию методов их инвентаризации на территории России, повышению точности региональных и глобальных моделей биогеохимического цикла углерода с учетом влияния на него климатических изменений. Полученные результаты могут служить основой для контроля и планирования производственной деятельности в сельском хозяйстве, направленной на уменьшение антропогенной нагрузки на геосистемы в плане снижения эмиссии парниковых газов в процессе землепользования. Результаты могут также использоваться при моделировании геосистемных функций накопления углеродного запаса в почве и для экономической оценки потенциала нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа в ландшафтах. Практически полезной является общедоступная авторская база данных № 2015620703 от 29.04.2015 г. «Агроклиматические ресурсы Центрального Нечерноземья».

В соответствии с поставленными задачами, О.Э. Суховеевой строится **структура диссертации**, отражающая в содержании ее название «Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории России на основе имитационного моделирования» с ключевыми словами: оценка, пространственно-временная

изменчивость, потоки CO_2 , агроландшафты России, имитационное моделирование. Они отражают объект, предмет и метод исследования.

Исследование получилось междисциплинарное, комплексное, связанное с разными аспектами работы по специальности – физическая география, биогеография, география почв и геохимия ландшафтов – с привлечением современных моделей и методов имитационного моделирования и статистического анализа пространственно-распределенных данных.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении в основном верно определены объект, предмет, цели, задачи и новизна предпринятого исследования. Сформулированы три положения защиты полученных научных результатов.

Первая глава содержит обзор литературы о биогеохимическом цикле углерода в агроландшафтах и проблемах его моделирования. Здесь показана роль диоксида углерода и других парниковых газов в современных климатических изменениях, содержание и преобразование органического вещества в почвах, рассмотрены дыхание почвы и чистый экосистемный обмен, что является предметом исследования, приведен обзор основных моделей для оценки потоков углерода и азота в геосистеме «атмосфера-растительность-почва». Показано, что в России эмиссия диоксида углерода, метана и закиси азота в результате функционирования сельского хозяйства в течение последних трех десятилетий постепенно уменьшается. Почвенное органическое вещество – одно из крупнейших пулов биогеохимического цикла углерода. В зависимости от состава и химической активности его разделяют на две, три или четыре фракции. В пахотных почвах под влиянием антропогенных факторов формируется специфический углеродный режим с неустойчивым углеродным балансом, с потерей органического углерода ($S_{\text{орг}}$) и снижением микробной биомассы. Эмиссия CO_2 в атмосферу из почвы определяется дыханием корней (1/3) и микроорганизмов (2/3), интенсивность которого в основном зависит от температуры и влажности почвы, что учитывается в математических моделях процесса. Чистый экосистемный обмен между экосистемой и атмосферой вычисляется как разность интенсивности фотосинтеза и дыхания биоты экосистемы. Дан обзор разработанных к настоящему времени математических моделей отдельных экосистем и биосферы в целом. Распространение получили модели углерод-азотного цикла, отражающие влияние внешних условий на формирование углеродного баланса, преобразование органического вещества в почве, а также временную динамику парниковых газов в атмосфере.

Вторая глава посвящена описанию имитационной модели DNDC, особенностей полевых опытов для ее верификации, в ней дается географическая характеристика Центрального Нечерноземья, на примере которого реализуется модель пространственно-временной оценки потоков CO_2 в агроландшафтах. Здесь описаны схемы и методы сбора и подготовки входных данных для DNDC, способы учета влияния внешних факторов на оцениваемые показатели и расчета эффективности моделирования. Для оценки влияния внешних условий на потоки CO_2 применялись корреляционный, регрессионный, кластерный и факторный методы анализа. Верификация модели проводилась по данным трех полевых опытов, расположенных в различных почвенно-климатических условиях. Эффективность моделирования дыхания пахотных почв оценивалась на примере Курской биосферной станции Института географии РАН и Полевой опытной станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Точность воспроизведения чистого экосистемного обмена дополнительно определялась на примере Опытного участка полупустынного пастбища учебного хозяйства «Раззак Джахонгиров» Самаркандского государственного университета (СамГУ) вблизи города Карнаб (Qarnob), расположенного в Пахтачийском районе Самаркандской области в западной части Узбекистана. Вычислительные эксперименты по оценке потоков CO_2 в агроландшафтах за 1990-2017 гг. проводились для Центрального Нечерноземья – 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. Оценивалось влияние на потоки CO_2 природных факторов: характеристик почвенного покрова, метеорологических условий, содержания $S_{\text{орг}}$ в почве, биологических особенностей культур, повышения концентрации CO_2 в атмосфере. Для анализа воздействия элементов

сельскохозяйственной практики были разработаны шесть вариантов использования агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы от чистого пара и неудобряемых посевов до применения интенсивных технологий с повышенными дозами удобрений. 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.

В третьей главе проводится апробация и верификация модели DNDC по данным полевых экспериментов, оценка ее эффективности при воспроизведении потоков CO_2 в агроландшафтах по сравнению с регрессионным моделированием, а также статистический анализ влияния гидротермических условий на динамику потоков CO_2 . В итоге проведена успешная верификация модели DNDC по материалам литературных источников и данным трех полевых опытов, представляющих собой различные типы агроландшафтов и расположенных в разных 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. Показано, что набор из 5 критериев эффективности (коэффициенты Нэша-Сатклиффа, Тэйла, корреляции, дисперсионный анализ и F-тест) 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. Выявлен недостаток модели – 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. Посредством парного 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.

В четвертой главе представлены результаты вычислительных экспериментов, реализованных на основе разработанной методики применения модели DNDC в географических условиях России. Проведен анализ воздействия внешних природных и антропогенных факторов на потоки CO_2 в системе «атмосфера – растительность – почва». Составлены ретроспектива и прогноз их динамики в пространстве и времени в зависимости от изменений условий географической среды на примере Центрального Нечерноземья. В рамках разработанной методики применения модели DNDC в России 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 при моделировании. Отмечено, что для всех выходных параметров модели наиболее значимыми факторами, определяющими особенности биогеохимического цикла C и потоков CO_2 в пахотных почвах Центрального Нечерноземья, являются антропогенные факторы, и, прежде всего, вносимые удобрения. Среди природных факторов основное влияние оказывают гранулометрический состав почвы и погодные условия, а также биологические особенности культур. На примере опытов КБС и ИФХиБПП РАН при различных почвенно-климатических условиях и интенсивности сельскохозяйственного производства модель DNDC прогнозирует рост абсолютных значений потоков CO_2 в агроландшафтах – фотосинтеза и дыхания почвы – при повышении его атмосферной концентрации, за счет чего баланс $C_{\text{орг}}$ в пахотных почвах Европейской территории России через 15-20 лет может достигнуть равновесия. Для оценки зависимости динамики компонентов биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах от их географического положения была рассчитана динамика дыхания почвы, нетто-экосистемного обмена и почвенного $C_{\text{орг}}$ в

Центральном Нечерноземье по семиречьям за 1990-2017 гг. По результатам анализа были построены карты, на основе которых можно проследить изменения потоков CO_2 в каждой области изучаемого региона в пространстве и времени в зависимости от типа почвы и преобладающих культур. Был также подтвержден вывод о преимущественном влиянии на потоки CO_2 антропогенного фактора через выбор возделываемых культур и применяемых технологий, через изменение интенсивности механизации и химизации. На основании анализа динамики и направления потоков CO_2 области Центрального Нечерноземья 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 почвенного дыхания. Показано, что 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 со стабильной структурой посевных площадей за последние три десятилетия суммарные значения дыхания почвы и чистого экосистемного обмена снижаются вследствие сокращения пахотных угодий.

В заключении подробно изложено содержание проведенной научно-исследовательской работы и сформулированы выводы, положенные в основу положений защиты. Основные положения диссертации имеют теоретическое значение и прикладную значимость для сельскохозяйственного производства. Работа О.Э. Суховеевой в целом – это фундаментальное научное исследование, а основные выводы представляются достаточно убедительными. Исследования автора, изложенные в ней, могут быть использованы в практике оценки эмиссии парниковых газов в процессе землепользования и оценки потенциала нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа в агроландшафтах.

Обсуждение результатов исследования. Для оценки достоверности выводов, полученных в диссертации О.Э. Суховеевой «Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории России на основе имитационного моделирования», необходимо независимым путем проверить работоспособность используемой программы и правильность ее применения в разных ландшафтных и хозяйственных ситуациях. Сложность научно-исследовательской задачи определяется тем, что в модели DNDC, судя хотя бы по публикациям С. Li с соавторами, используется 125 различных уравнений, проанализировать достоверность работы которых в конкретных ландшафтных условиях невозможно, да и натурные измерения такого рода для каждого ландшафта отсутствуют. Даже дыхание почвы (один из предметов исследования) рассчитывается по трем уравнениям с 20 переменными, которые, в свою очередь, зависят от других параметров, что в опытах не измерялись и даже напрямую с дыханием не связаны. Кроме того, понятно, что содержание модели и коммерческой программы защищены авторским правом и не доступны для подробного анализа.

В итоге, реализация готовой компьютерной программы в ходе вычислительного эксперимента во многом похожа на проведение натуральных инструментальных наблюдений, поскольку в обоих случаях мы имеем дело с объектами исследований, рассматриваемых в качестве «черных ящиков» – систем с известными входами и выходами, но неизвестным внутренним устройством и механизмами их работы. Система-«белый ящик» имеет, напротив, известную структуру, а соответствующая ей модель описывается системой уравнений, связывающей входы и выходы. Тогда для местных геосистем, зная уравнения связи, чисто аналитическим путем можно получить простые локальные зависимости между показателями входов и выходов.

Для геосистем с неизвестной структурой эти закономерности формализуются следующим образом.

Связь наборов параметров входов $x=\{x_i\}$ и выходов $y=\{y_j\}$ в общем случае описывается различными функциями $y_j = F_j(x)$. В локальном варианте для местных геосистем эти функции аппроксимируются линейными зависимостями: $y_j = a_j \cdot (x - x_0) + y_{0j}$. Здесь x – набор факторов, x_0 – набор условий, $y_{0j} = y_j(x_0)$, $a_j \cdot (x - x_0)$ – скалярное произведение. В общем случае коэффициенты $a_j = \{a_{ji}\}$ являются переменными величинами, зависящими от значений входных параметров $x=\{x_i\}$, т.е. функция $y_j(x)$ нелинейно зависит от x . В силу этого естественно, что более сложные модели,

принимаящие во внимание изменчивость входных параметров, должны давать более точную аппроксимацию наблюдаемых данных, чем уравнения регрессии с постоянными коэффициентами.

Зависимости для разных функций $y_j(x)$ представляет собой пучок линейных связей $y_j - y_{0j} = a_j \cdot (x - x_0)$. Она эквивалентна уравнению множественной регрессии $y_j = a_j \cdot x + b_j$ при $b_j(a_j) = -a_j \cdot x_0 + y_{0j}$. Иными словами, если коэффициенты парной или множественной линейной связи линейно зависимы $b_j(a_j)$, то все эти связи относятся к одному типу, соответствующему единым условиям географической среды с параметрами x_0 и y_0 . Существование пучков, или комплексов линейных связей, указывает на правильность работы модели $y = F(x)$ в данных условиях. По этой причине достоверность работы модели в каждой ситуации сводится к проверке гипотезы линейной связи $b_j(a_j)$ коэффициентов регрессионных уравнений.

К сожалению, в диссертации мало результатов расчетов, позволяющей провести подобный анализ. Например, на с. 98 на примере данных Курской биосферной станции ИГ РАН (КБС) приведены линейные зависимости интенсивности дыхания черноземной пахотной почвы под четырьмя культурами (озимой пшеницей, ячменем, картофелем и подсолнечником) от температуры почвы на глубине 5 см. В этом случае показатель комплексования $b_j(a_j)$ оценивается высоким значением $R^2=0,98$, что говорит в пользу диссертанта.

Если бы работа была выполнена по специальности «Геоинформатика», то при оппонировании не было бы лишних вопросов: в диссертации присутствуют все элементы компьютерного сбора и преобразования пространственных и временных данных. К физико-географическому исследованию ее можно было бы прямо отнести, если бы модель создавалась самостоятельно или существенно улучшались известные уравнения связи геосистемных параметров, выявленных в результате натурных исследований и анализа данных. Когда используется готовая модель и вычислительная программа, оценивается степень адекватности модели, проводится ее калибровка-подгонка под реальные условия, сравниваются результаты расчета с имеющейся информацией о процессах, трудно судить об ее ландшафтоведческом значении, о вкладе в развитие геосистемного подхода.

С другой стороны, диссертация с формальной точки зрения соответствует важным пунктам, требуемым по специальности 25.00.23 – физическая география ..., а именно: 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.

В данной диссертации реализуется подход, напрямую связанный с пониманием главных задач «математического моделирования», особенно в части исследования моделей как замены реальных объектов, процессов и явлений с целью их объяснения, и предсказания. На этом этапе модель выступает как самостоятельный объект исследования, и одной из форм такого исследования является вычислительный эксперимент, при котором меняются входные факторы и условия функционирования модели и систематизируются данные о её реакции на выходе для получения знаний о модели. На следующем этапе необходимо проинтерпретировать полученные результаты в географических терминах. Затем осуществляется практическая проверка полученных с помощью моделей знаний, и модель используется для построения теории объекта, его преобразования через управление.

В этом, на наш взгляд, заключается оригинальность предпринятого физико-географического исследования, отличающего его от других работ в этой области знаний. Такие исследования широко распространены, например, в физической науке, – в географии они единичны по причине отсутствия развитых математических теорий реализации геосистемных функций в силу сложности объекта исследования. Должен быть решен основной вопрос моделирования – насколько теоретически качественна используемая модель и насколько она универсальна, чтобы применять ее в различных ситуациях?

В контексте общей постановки задачи расчета природных функций по уравнению $y_j - y_{0j} = a_j \cdot (x - x_0)$ оценочные функции $y_j(x)$ должны быть однородными функциями первого порядка, в частности, линейными зависимостями. Нелинейные зависимости возникают в случае влияния входных параметров x на спектр коэффициентов a_j , но они также должны быть однородными функциями со свойством масштабирования $y_j(tx) = ty_j(x)$. Большинство природных зависимостей нелинейные и линейны (линеаризуемы) только в локальной области значений параметров. Кроме того, функции оценки, как правило, имеют положительные значения.

Во второй главе диссертации дается описание имитационной модели DNDC – процессно-ориентированной имитационной модели, созданной для оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода и азота, включая биогенные парниковые газы, в почвах сельскохозяйственного назначения. Модель должна учитывать взаимосвязи между эмиссией парниковых газов в почве, факторами окружающей среды и экологическими процессами. Она призвана описывать рост сельскохозяйственных культур и почвенные биогеохимические циклы, циклы азота, углерода и воды в агроэкосистемах. Модель состоит из трех субмоделей: термо-гидрологической, блока азота и блока углерода. Все расчеты проводятся с суточным шагом.

Диссертант работает в режиме анализа «черного ящика» связи «вход-выход». Входными параметрами модели являются: климатические или погодные условия (среднесуточные максимальные и минимальные температуры и количество осадков, солнечная радиация, концентрация CO_2 в атмосфере и содержание азота в осадках), характеристики почвенного покрова (содержание физической глины, плотность, pH, полевая влагемкость, 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). При таком обилии входных параметров задача информационного обеспечения модели сама по себе является сложной исследовательской задачей.

В уравнениях модели DNDC интегрируются известные знания о внутрипочвенных процессах, происходящих на фоне изменчивой внешней среды (потоков). Модель строится на основе уравнений Нернста и Михаэлиса-Ментен, описывающих термодинамические и кинетические особенности окислительно-восстановительных реакций. Формула (8) для скорости разложения углеродного пула – это произведение положительных безразмерных поправочных коэффициентов типа μ_T – для температуры, μ_W – для влажности. Уравнения зависимости коэффициентов от температуры и влажности имеют вид перевернутой параболы (9) и (10). Это означает, что при очень высоких и низких значениях факторов поправочные коэффициенты будут отрицательными, что противоречит естественному смыслу формулы (8). Иными словами, эта формула имеет ограниченное действие в окрестности максимального значения коэффициентов и не работает в экстремальных условиях, что важно учитывать при географическом анализе. Причем модальное значение фактора положения этого максимума в модели фиксировано, а в действительности оно объектно- и средообусловлено, как это принято считать в факториальных моделях экологических ниш. Отсюда понятно, откуда возникает выявленный в диссертации недостаток работы модели при экстремальных значениях параметров – занижение дыхания корней в летнее время при высоких температурах воздуха, пересыхании пахотного слоя почвы и недостатке в нем питательных веществ.

Непонятна формула (11) для коэффициента поглощения глиной: $\mu_{\text{clay}} = \log(0,14/\text{Clay}_1) + 1$, где Clay_1 – доля глинистой фракции. Получается так, что если глина в механическом составе почвы отсутствует, то $\mu_{\text{clay}} = \infty$, что противоестественно. Должны обязательно учитываться ограничения на значения фактора $0,14 \leq \text{Clay}_1 \leq 1,0$.

Для исследования модели использовались методы описательной статистики, а также корреляционный и регрессионный, кластерный и факторный методы анализа. Достоверность коэффициентов корреляции Пирсона между потоками CO_2 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 CO_2 (дыхание почвы или чистый экосистемный обмен). Уровень значимости коэффициентов регрессии также составлял $P = 0,05$. Для модели DNDC была проведена проверка путем сравнения ее результатов с данными полевых измерений, опубликованных в литературных источниках.

Лично автором обоснованы и скорректированы внутренние настройки и параметры модели, которые обычно принимают "по умолчанию". Для приведения их в соответствие с условиями России были исправлены характеристики почвы и биологические особенности возделываемых культур. О.Э. Суховеева аргументировала и разработала методику сбора и подготовки материала для моделирования по атрибутам баз данных – метеопоказателям, урожайности, агротехнике и удобрениям. Для осуществления привязки модели к определенному географическому положению рассчитана динамика потоков CO_2 (дыхание почвы, чистый экосистемный обмен, потоки органического углерода в почве) в Центральном Нечерноземье за 28 лет (1990-2017 гг.) Это позволило сравнить изменчивость потоков в пространстве и во времени, оценить их чувствительность к внешним природным и антропогенным воздействиям. По результатам анализа построены карты, при создании которых было использовано 3,5 тысячи значений потоков CO_2 . По картам можно проследить их пространственно-временные изменения в каждой области изучаемого региона. 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 в нескольких областях с реализацией в каждом случае несколько сценариев, учитывающих возможность изменения особенностей технологии возделывания земель.

Даже при относительно небольшом числе полевых наблюдений ($N < 20$) и недостатке входной информации имитационная модель за счет заложенных в нее закономерностей позволяет с хорошим приближением воспроизводить процесс дыхания почвы. Этот пример, который можно считать успешным, подтверждает применимость имитационного моделирования как инструмента для анализа ландшафтных процессов. Судя по графикам, модель в общих чертах (достоверно) отражает сезонную динамику показателей. Коэффициенты детерминации не высокие, но значимые на уровне 0,95.

Полученные по территории Узбекистана расчетные данные хорошо согласуются с оценками зарубежных исследователей, доказавших возможность успешного использования этой модели для оценки баланса CO_2 на пастбищах Монголии и северо-западной Европы. Рассмотренные примеры подтверждают применимость имитационных моделей для оценки влияния внешних факторов на интенсивность фотосинтеза, поскольку такое воздействие трудно количественно оценить из-за сложности проведения полевых опытов.

Положения, выносимые на защиту, обоснованы и имеют признаки научной новизны. Достоверно показано, что исследуемые почвенные геохимические процессы могут быть количественно оценены на основе используемой математической модели DNDC с привлечением местных данных по агроландшафтам различных территорий. Разработанная методика идентификации DNDC на территории России приемлема для анализа и прогноза потоков CO_2 в агроландшафтах и позволяет с большей точностью оценить их величину; расчеты по модели оказались точнее, чем вычисления по эмпирическим регрессионным зависимостям потоков от температурных и влажностных параметров. На основе модели и результатов ее идентификации доказано, что в пахотных агроландшафтах основной зоны сельскохозяйственного использования земель Европейской территории России антропогенные факторы оказывают определяющее влияние на динамику формирования потоков CO_2 , а действие физико-географических гидротермических факторов среды оказывается вторичным.

В итоге диссертант О.Э. Суховеева впервые разработала и реализовала комплексную методику исследования геосистемных функций на основе математической модели с выходом на сравнительно-географический ретроспективный анализ и прогноз. Она провела апробацию модели DNDC для участков территорий России и Узбекистана и подтвердила адекватность ее работы в целом. Она выделила ограничения использования этой модели, что особенно важно и могло бы

быть сформулировано как самостоятельное положение защиты. Продемонстрированные достоинства и особенно недостатки используемой модели DNDC потребуют дальнейших комплексных исследований по моделированию геосистемных процессов в направлении улучшения работы модели на основе многочисленных имеющихся и новейших эколого-географических данных в рамках факторного анализа, факториальной экологии и факториальной ландшафтной географии для учета факторов и условий влияния среды, особенно в экстремальных условиях и пессимумах функциональных реакций. В этом аспекте интересно будет использование методов ландшафтно-интерпретационного анализа и картографирования с применением средств геоинформационного моделирования и картографирования.

Общий вывод. Представленная на рассмотрение диссертация основывается на достижениях как отечественной, так и зарубежной физико-географической науки, и практики. Материалы работы свидетельствуют о серьезном личном вкладе автора в географическую науку в области исследования геосистемных функций. Критическое рассмотрение полученных О.Э. Суховеевой научных результатов показывает, что поставленные ею задачи исследования решены. Представленная к защите работа хорошо структурирована, а логическая последовательность изложения материала диссертации создает целостное представление о развитии методологии (системе методов) исследования. Содержащиеся в работе схемы, формулы, графики, карты, рисунки и таблицы наглядны и отражают защищаемые положения. По результатам исследования диссертантом опубликованы 25 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации для публикации результатов диссертационных работ, а также 3 статьи в рецензируемых журналах из базы РИНЦ.

С учетом характера научных результатов, их научной и практической значимости констатируем, что в представленном диссертационном исследовании разработаны научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для развития перспективного направления в географической науке – геосистемного моделирования. В работе также содержатся разработки, обеспечивающие решение важной хозяйственной проблемы по мониторингу, анализу, оценке и прогнозу потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории России.

Таким образом, рассматриваемая диссертационная работа Ольги Эдуардовны Суховеевой является самостоятельным, логично построенным научным исследованием, вносящим заметный вклад в развитие научных направлений, определяемых специальностью защиты, и соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа соответствует паспорту специальности «25.00.23 - Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов» и требованиям пп. II-9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 01.10.2018 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.23 - Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов.

Черкашин Александр Константинович, д.г.н., профессор, зав. лабораторией теоретической географии Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, Иркутск.

664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.

e-mail: cherk@mail.icc.ru, akcherk@irnok.net

тел. 83952-42-26-87.

07 ноября 2018 г.




Подпись *А.А. Черкашин* ЗАВЕРЯЮ
А.А. СОРОКОВОЙ