

УДК 001.57:550.47:631.4

doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.473-501

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА В АГРОЛАНДШАФТАХ

О.Э. Суховеева

Институт географии РАН, г. Москва, 119017, Россия

Аннотация

Статья посвящена особенностям цикла углерода в почве, которые формируются в результате сельскохозяйственного использования и должны быть учтены при математическом воспроизведении, в том числе оценке эмиссии парниковых газов и специфического углеродного режима пахотных почв. Разработана классификация углеродных моделей, согласно которой они разделены на глобальные (углерод-азотные и много-элементные) и экосистемные, которые, в свою очередь, распределены на чисто углеродные (агроэкосистемные, фитоценоотические, эмиссии парниковых газов CO_2 и CH_4) и углерод-азотные (широкого спектра экосистем, лесные, микробиологические). Сформулированы основные сложности применения математических методов при описании цикла углерода, в том числе многообразие методик расчета; высокие требования к входным данным; ограниченная доступность исходной информации; необходимость отражения климатических изменений; погрешности в описании функциональной зависимости эмиссии CO_2 от температуры. Рассмотрены трудности количественной оценки компонентов биогеохимического цикла углерода, то есть двоякая роль почвы как стока и источника соединений углерода, являющихся парниковыми газами; взаимодействие углеродного и азотного циклов; разделение пула почвенного органического углерода на фракции; соотношение микробного и корневого дыхания. Развитие моделей будет способствовать лучшему учету потоков парниковых газов, повышению точности оценки влияния на них климатических и антропогенных факторов, разработке стратегии снижения их эмиссии.

Ключевые слова: агроэкосистемы, антропогенное воздействие, биогеохимические циклы, дыхание почвы, изменение климата, имитационное моделирование, источники и стоки углерода, парниковые газы, почвенное органическое вещество, почвенный органический углерод, сельское хозяйство, углеродные модели, эмиссия диоксида углерода

1. Модели и моделирование цикла углерода

Модели – структурированные имитации характеристик и механизмов систем, позволяющие воспроизводить их появление или функционирование. 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 [1]. Имитационная биогеохимическая модель – программно реализованная совокупность алгоритмов, описывающих комплекс процессов, протекающих в системе «почва – растительный покров – атмосфера» [2]. Модели типа ПРАП (Почва – Растительность – Атмосфера – Перенос), или SVAT (Soil – Vegetation – Atmosphere – Transfer),

дают комплексную информацию для оценки явления и преимущество при формировании системы принятия экологически безопасных управленческих и хозяйственных решений [3].

Сегодня большинство моделей реализуется на компьютере [4]. В их основе лежит блоковый подход: исследуемая система представляется в виде схемы из нескольких блоков и связывающих их потоков, которые описываются функциональными зависимостями, а их количество определяется целями исследования. Модели оформляются в виде исполняемого программного файла и преобразуют совокупность входных данных в выходные показатели, характеризующие ход и результат рассматриваемого процесса. Создание модели завершается оценкой чувствительности ее параметров к изменению исходных данных и верификацией [5], которая осуществляется путем сравнения выходных данных с результатами полевых наблюдений [6].

Модели влияния внешних факторов на изменение запасов и потоков биогенных элементов в экосистемах и взаимодействия геосферных оболочек разного масштаба начали активно развиваться во второй половине XX в. [7–9], в том числе для воспроизведения взаимосвязей между потеплением климата, концентрацией парниковых газов в атмосфере и депонированием углерода в наземных экосистемах [10–12]. Сейчас статистическая обработка и построение математических моделей широко используются в различных отраслях наук о Земле [13], и в зависимости от масштаба анализируемых объектов они могут быть разделены на планетарные, материковые, региональные, локальные, экосистемные, а также модели, описывающие отдельные компоненты экосистемы [14]. Наиболее эффективны модели для оценки потоков углерода и поиска возможностей снижения эмиссии парниковых газов на уровне хозяйства [15].

Нами разработана классификация моделей (табл. 1) на основании типа рассматриваемой экосистемы и ее масштаба, а также выходных данных. Таким образом, существующие углеродные модели разделены на глобальные (углерод-азотные и многоэлементные) и экосистемные, а последние, в свою очередь, – на чисто углеродные (агроэкосистемные, фитоценоотические, эмиссии парниковых газов CO_2 и CH_4) и углерод-азотные (широкого спектра экосистем, лесные, микробиологические).

Использование моделей дает следующие преимущества:

- замена реальных объектов исследования при невозможности проведения экспериментов или сложности выполнения их измерений;
- альтернатива многолетнему мониторингу;
- выявление закономерностей функционирования объекта, недоступных для идентификации в полевых условиях;
- оценка отклика экосистем на изменение внешних условий и определение среди них важнейших факторов.

Отдельно для углеродных моделей можно выделить такие достоинства, как:

- совокупный учет типа почвы, растительного покрова и землепользования;
- прогноз эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства и разработка стратегии ее снижения,

Табл. 1

Классификация моделей (по материалам [16])

ТИП МОДЕЛЕЙ					
Экосистемные			Глобальные		
Углеродные	Источник	Углерод-азотные	Источник	Источник	
Эмиссия парниковых газов (CO ₂ и CH ₄)		Лесные		Углерод-азотные	
MEM (Methane emission model, Модель эмиссии метана)	[17]	CNTEM (Carbon-nitrogen terrestrial ecosystem model, Углерод-азотная модель экосистемы суши)	[24]	BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, Схема биосферно-атмосферного переноса)	[33]
T&P (Temperature and precipitation, Температура и осадки)	[18]	EFIMOD (Forest ecosystem model, Модель лесной экосистемы, индивидуально-ориентированная система моделей)	[25]	ISAM (Integrated Science Assessment Model, Комплексная научная оценочная модель)	[34]
Фитоценологические		Широкого спектра экосистем		LPI-DGVM (Lund-Posdam-Jena dynamic global vegetation model, Лунд-Потсдам-Йенская динамическая глобальная вегетационная модель)	[35]
DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, Система поддержки принятия решений для изменения агротехнологий)	[19]	CENTURY (Век) DNDC (DeNitrification-DeComposition, Денитрификация – Разложение) ECOSYS (от ecosystem – экосистема) O-CN (carbon and nitrogen cycle dynamics, динамика циклов углерода и азота) ROMUL и ROMUL_HUM (модель динамики органического вещества в почве) TEM (Terrestrial ecosystem model, Модель экосистемы суши)	[26] [27] [28] [29] [30] [31]	UVicESCM (University of Victoria's Earth System Climate Model, Модель климатической системы Земли Университета Виктории)	[36]
RCSODS (Rice Cultivation Simulation Optimization-Decision Making System, Имитационная система оптимизации и принятия решений при возделывании риса)	[20]			АРПО (Атмосфера – Растения – Почва – Океан)	[37]
SiB (Simple Biosphere, Простая биосфера)	[21]				
Wageningen (Вагенинген)	[22]				
Агроэкосистемные		Микробиологические		Многоэлементные	
RothC (Rothamsted Carbon, Ротамстед-углерод)	[23]	MiCNiT (Microbial Carbon and Nitrogen turnover, Микробный круговорот углерода и азота), в составе MoBiLE (Molecular Biosphere simulation Environment, Модульная биосферная имитация окружающей среды)	[32]	CYCLES (Циклы) МБМ (Московская биосферная модель)	[38] [39]

- возможность создания единого метода инвентаризации эмиссии и поглощения парниковых газов в зависимости от комплекса природных и антропогенных факторов на региональном уровне.

Среди реализованных за последние годы проектов по моделированию почвенных процессов следует указать европейские NOFRETETE, NitroEurope [40] и CAPRI [41], международную программную инициативу FACCE-JPI по сельскому хозяйству, продовольственной безопасности и изменению климата между Евросоюзом, США, Канадой, Новой Зеландией, Австралией [42], а также международный проект по оценке динамики органического вещества (ОВ) почв на примере семи длительных опытов в Европе, США и Австралии, в котором были применены такие модели как CANDY, CENTURY, DAISY, DNDC, ITE, NCSOIL, RothC, SOMM, VERBERNE [43].

2. Особенности цикла углерода в агроэкосистемах

Сельское хозяйство как форма антропогенного изменения природных систем воздействует на крупнейшие пулы наземной части биогеохимического цикла углерода – растительную биомассу и почвенное ОВ. Одновременно оно является одним из основных источников парниковых газов, в связи с чем агроэкосистемы не только испытывают на себе воздействие современных климатических изменений, но и способствуют им. Ввиду особенностей антропогенного влияния, в пахотных почвах формируется специфичный углеродный режим, характеризующийся потерей органического углерода ($C_{\text{орг}}$), неустойчивым его балансом, снижением содержания микробной биомассы.

Агроценозы – экосистемы с наиболее динамичным и неустойчивым балансом ОВ [44]. К агроэкологическим факторам формирования углеродного режима пахотных почв относятся длительная распашка и другая интенсивная обработка, недостаточное поступление ОВ с растительными остатками, применение минеральных и отсутствие органических удобрений, многолетнее возделывание монокультуры, недостаточно научно обоснованные приемы мелиорации, развитие эрозийных и дефляционных процессов, что приводит к уменьшению гумусированности пахотного горизонта и функциональной активности микробиоты [45, 46], а также к снижению содержания потенциально-минерализуемого углерода [47].

Растительные остатки в агроценозах восполняют не более 2.5–10.8% углерода, потерянного при дыхании почвы [48]. В пахотных почвах по сравнению с лесными и луговыми фитоценозами существенно снижается не только содержание микробной биомассы [49], но и устойчивость микробных сообществ и их метаболический коэффициент [50], а также ослабляются связи между содержанием гумуса и активностью гидролитических ферментов [51]. Отношение микробной биомассы к количеству $C_{\text{орг}}$ в обрабатываемых почвах почти в три раза меньше по сравнению с естественными экосистемами [52].

Таким образом, пахотные почвы теряют от 24% [53] до 1/2–2/3 исходного количества $C_{\text{орг}}$ [54]. В них содержится в 1.9–3.9 раза меньше потенциально-минерализуемого углерода, чем в почвах естественных угодий, а минерализуемость ОВ даже при оптимальных условиях температуры и влажности не превышает 2.3–6.2% от $C_{\text{орг}}$ [55].

Специфический водный режим и отчуждение возделываемых культур приводят к большим годовым колебаниям содержания $C_{\text{орг}}$ в верхнем пахотном слое почв. Например, для дерново-подзолистой суглинистой почвы Смоленской области такие сезонные изменения запасов углерода гумусовых веществ за год составили 11.4% от максимальных запасов углерода гумуса, а за два года – 20.4% [56]. Для пахотной подзолистой супесчаной почвы Кировской области уменьшение углерода лабильных соединений составляет 0.05% за сезон [57].

Использование минеральных удобрений способствует сохранению ОБ, накоплению трансформируемого и подвижного углерода [58]. Для повышения его содержания необходимо использование органических удобрений. На 1 т азота, внесенного с навозом, прирост содержания ОБ достигает 216–350 мг, что эквивалентно увеличению размеров активного пула на 30–80 мг C/100 г серой лесной почвы [59]. Одновременно происходит переход гумуса из прочносвязанного состояния в более активные формы [60].

3. Сложности применения математических методов при описании цикла углерода

3.1. Многообразие методик расчета. Единого метода оценки потоков парниковых газов на сегодняшний день не существует.

В методике МГЭИК, на основе которой подготавливаются «Национальные кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов...», учитывается только антропогенная эмиссия, причем поток парниковых газов от пахотных почв разделяется на две части [61]: в секторе «Землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства» учитываются показатели прямой эмиссии CO_2 и CH_4 ; в секторе «Сельского хозяйства» представлены эмиссия CO_2 от известкования и внесения мочевины, CH_4 от рисоводства и использования органических удобрений, а также выбросы N_2O из почв.

С успехом также применяются:

- балансовый подход – для определения динамики CO_2 в наземных экосистемах в различных масштабах [62, 63];
- картографический метод – наложение друг на друга различных типов карт для интеграции потоков CO_2 в пахотных почвах [64, 65];
- геоинформационный анализ – для оценки поглощения CO_2 лесами и потенциального запаса углерода в растительном покрове [11, 66];
- регрессионные зависимости эмиссии CO_2 от гидротермических или почвенно-климатических параметров среды [67–69].

3.2. Высокие требования к входным данным. Точность имитационного моделирования зависит от высокого количества и качества входных данных [70]. Неоднородность методов определения ОБ почв и недостаточность экспериментальных данных для построения моделей служат серьезными факторами, сдерживающими развитие моделирования цикла углерода [71].

Для наиболее корректной оценки углеродного цикла модель должна быть модифицирована, или настроена, в соответствии с конкретными условиями местности [72], например, оптимизированы характеристики культур и другие входные

параметры [73]. Важными факторами формирования местных особенностей являются также различное количество осадков [74] и изменение качества почв [75].

Эта проблема может быть решена благодаря использованию официальной статистической информации и данных литературных источников, которые хорошо проявляют себя при апробации моделей для расчетов потоков углерода в агроценозах [76]. Вторым вариантом решения – применение ансамблевого [77], или мультимодельного, подхода [78], при котором общая модель представляется в виде совокупности локальных и вводятся переменные, характеризующие региональные особенности [79].

3.3. Ограниченная доступность входной информации. Современная форма предоставления официальной статистической информации налагает определенные ограничения на ее использование в моделировании [80]:

- официальные данные усредняются на основе административно-территориального деления;
- границы субъектов России и административных образований не совпадают с границами экосистем, природных зон, почвенных районов;
- севообороты (чередование культур в пространстве и времени) не всегда соблюдаются, а доля каждой культуры в них не выносится в открытый доступ;
- площадь пашни и площади выращивания каждой культуры ежегодно изменяются;
- неизвестны типы почв, на которых расположены пахотные земли;
- неизвестны территории, на которых возделывается каждая культура;
- неизвестны сорта выращиваемых культур и потребности каждого из них в тепле и влаге;
- неизвестны сроки посева и уборки, даты проведения почвообрабатывающих мероприятий.

3.4. Отражение климатических изменений. На фоне современных изменений климата возрастает значение имитационного моделирования, поскольку формируются новые погодные условия, сочетание которых не встречалось за прошлые периоды инструментальных наблюдений, что при построении моделей других типов может привести к ошибкам при экстраполяции данных [81].

Необходимо вводить коэффициенты, учитывающие принцип Ле-Шателье, на котором основывается способность экосистем ослаблять антропогенные воздействия, поскольку он выполняется до определенного порога, после достижения которого в результате выбросов CO_2 в атмосферу эффект парниковых газов начинает усиливаться [82].

3.5. Описание зависимости от температуры. В большинстве современных углеродных моделей отклик эмиссии CO_2 на изменения температуры и влажности представлен в виде простых эмпирических нелинейных функций [83]. В агроландшафтах оптимальные для активности микроорганизмов температуры, лежащие в диапазоне 35–45 °C, обычно приходятся на период недостатка влаги. Таким образом, уравнения Вант-Гоффа и Аррениуса, используемые для описания влияния температур в широком их диапазоне на скорость разложения ОВ, системати-

чески недооценивают ее при низких температурах и переоценивают при высоких [84]. Гидротермические условия зависят от особенностей субстрата и, соответственно, чем легче разлагается ОВ, тем более чувствительна к ним скорость этого процесса [85].

Для решения этой проблемы целесообразно вывести новые эмпирические закономерности, переменными в которых будет выступать не только температура, но и влажность субстрата.

4. Сложности количественной оценки компонентов биогеохимического цикла углерода

4.1. Роль соединений углерода как парниковых газов, источником и стоком которых одновременно является почва. Углекислый газ, или диоксид углерода (CO_2), и метан (CH_4), являющиеся компонентами углеродного цикла, одновременно выступают как парниковые газы. Доля CO_2 в их суммарном радиационном воздействии составляет 63%, метана – 18.5% [86]. Общее радиационное воздействие на атмосферу, создаваемое долгоживущими парниковыми газами, выросло на 29%, причем 4/5 этого увеличения приходится на CO_2 [87].

Концентрация CO_2 увеличилась от 285 ppm в начале XIX в. до 335–338 ppm к 80-м годам XX в., а концентрация CH_4 достигла 1.7 ppm [88]. В 2010 г. уровни содержания CO_2 и CH_4 были равны 398.0 ppm и 1808 ppb соответственно [89]. К 2017 г. они выросли до 405.5 ppm для CO_2 и 1859 ppb для CH_4 [90].

Глобальная эмиссия углерода от землепользования и обработки почвы, в том числе в результате вырубки лесов, сжигания биомассы, преобразования природных экосистем в сельскохозяйственные и осушения болот, составляет 136 ± 55 млрд т [54]. Поток CH_4 на территории России оценивается в 40–50 млн т $\text{C} \cdot \text{год}^{-1}$ [91], при этом важнейшими его источниками являются рисовые поля и болота [92].

Часть образующегося в почве CO_2 подвергается биотической и абиотической фиксации. Способностью ассимилировать CO_2 обладают автотрофные, а также анаэробные и аэробные гетеротрофных бактерии и грибы [93, 94]. Среди абиотических факторов преобладают растворение, сорбция, выпадение карбонатов, защемление в микропорах [95]. Так, фиксация CO_2 в пахотной почве Джорджии (США) составляла $0.15 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [96], а посевах ячменя в Огайо (Канада) была равна $0.4 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [97].

На долю почвы приходится 5.4% глобального стока CH_4 [81]. Медиана скорости поглощения CH_4 используемыми в сельскохозяйственном производстве почвами составляет $0.017 \text{ мг C-CH}_4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [98]. Потребление CH_4 в обрабатываемых почвах умеренной и субтропической зон идет со скоростью 0.013 ± 0.007 и $0.005 \pm 0.006 \text{ мг C-CH}_4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [99].

4.2. Взаимодействие углеродного и азотного циклов. На начальном этапе развития моделирования создавались физико-математические модели углеродного цикла без учета влияния на него круговоротов других биогенных элементов [100–103].

В регионах с недостатком доступного для растений минерального азота в почве этот элемент оказывает лимитирующее действие на интенсивность фото-

синтеза, продуктивность растительного покрова, а также скорость разложения надпочвенного детрита и ОВ почвы [104]. Вследствие этого узкоспециализированный учет потоков CO_2 и их связей с температурой не позволяет смоделировать реалистичный углеродный баланс [105]. Это послужило толчком к интегрированию в углеродные модели азотного блока, учитывающего поступление азота, преимущественно от его антропогенных источников. Такие углерод-азотные модели позволяют оценить запасы и потоки этих элементов в растительности, детрите и ОВ почвы, а также определить их возможные изменения при потеплении климата [106].

При совместном использовании в моделях углеродного и азотного циклов у первого практически полностью ослабляются обратные связи с климатом [24], уменьшается отклик на межгодовую изменчивость приповерхностной температуры и количества осадков [107]. Результаты моделирования также свидетельствуют о снижении интенсивности поглощения CO_2 растительностью, обусловленного возрастанием его концентрации в атмосфере, при отсутствии роста приповерхностной температуры [108, 109], и сокращение стока углерода в наземные экосистемы на 53–78% [110].

4.3. Разделение пула почвенного органического углерода на фракции.

Для целей моделирования важна позиция, которой придерживается разработчик алгоритма, относительно разбиения ОВ почвы на пулы. На сегодняшний день существует несколько подходов к этому разделению, результатом которого могут быть от двух до четырех фракций (табл. 2). Чаще всего исследователи придерживаются деления на пул легкодоступных для разложения органических соединений (активный) и пул устойчивых к биодegradации гумусовых веществ (пассивный, или стабильный) [111]. Так, фитодетрит и подвижные гумусовые вещества, которые легко переходят в растворимую форму, относят к легкоминерализуемым органическим веществам, для полного разложения и новообразования которых требуется от нескольких месяцев до нескольких лет; пассивному пулу для этого требуется период до нескольких тысяч лет [112, 113].

4.4. Соотношение микробного и корневого дыхания. Почвенное дыхание, или эмиссия CO_2 из почвы, формируется дыханием корней и микробным разложением ОВ почвы, отмерших растительных остатков и органических веществ, продуцируемых вегетирующими корнями [124–128]. Каскад «растение – микроорганизмы – почва» образует обратные связи в цикле углерода и регулирует реакции экосистем на изменения климата [129]. Количественные характеристики дыхания почвы сильно зависят от метода определения, и наиболее точно оценить вклады корневого и микробного потоков можно только с помощью метода субстрат-индуцированного дыхания [130].

Дыхание корней зависит от продолжительности периода вегетации и активности ассоциированных с корнями ризосферных микроорганизмов [131]. Доля дыхания корней может варьировать в широких пределах (табл. 3) и по различным оценкам составлять 18–50% [132], 30–40% [69, 133, 134], 35–57% [135], 50–60% [131, 136].

Табл. 2
Разделение почвенного органического углерода на фракции

Принцип разделения	Тип почвы	Фракция, пул	Доля	Источник
Две фракции	Чернозем обыкновенный малогумусный	Лабильная Стабильная	0.24 мг С/г почвы 20.6 мг С/г почвы, 98.9–99.6% от $C_{орг}$	[114]
	Чернозем типичный	Активная Пассивная	2.56% 3.59%	[115]
	Серая лесная супесчаная	Подвижный	19–28 т С/га, 21–31% от $C_{орг}$	[116]
	Чернозем выщелоченный	Легкоминерализуемый, в т.ч. лабильный гумус детрит мортмасса	3890 мг С/кг почвы, 10.3% от $C_{орг}$ 1546 мг С/кг почвы, 4.1% от $C_{орг}$ 627 мг С/кг почвы, 1.7% от $C_{орг}$	[117]
	Каштановая сухостепной зоны	Легкоминерализуемый Трудноминерализуемый	1.6% на целине и на залежи 9–21%, на залежи меньше, чем на целине	[118]
	Дерново-подзолистая супесчаная	Легко минерализуемая Умеренно минерализуемая Трудно минерализуемая	6–11% от $C_{орг}$ 34–65% от $C_{орг}$ 26–94% от $C_{орг}$	[119, 120]
Три фракции	Все типы	Активный Медленный (промежуточный) Пассивный	от < 1% до 8% от $C_{орг}$ 35–72% 39–64%	[121, 122]
	Все типы	Легкоразлагаемое органическое вещество Лабильный биоактивный гумус Стабильный биоактивный гумус Относительно бионертный гумус	1.5% от $C_{орг}$ 26% от $C_{орг}$ 22% от $C_{орг}$ 42% от $C_{орг}$	[123]

Табл. 3

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%	[137]
Китай	Газовая хроматография	Пшеница	64%	[138]
		Рис	77%	
Нидерланды	Импульсное мечение ¹⁴ C	Пшеница и ячмень	89–95% в фитокамере, 75% в поле	[139]
Лабораторный опыт	Раздельная инкубация	Кукуруза	8–32%	[140]
Лабораторный опыт	Краткое ингибирование микробного дыхания	Кукуруза	16–24%, может достигать 94%	[141]
Вегетационный опыт	Меченые изотопы ¹³ C	Овес	61–92%, включая долю дыхания ризосферных микроорганизмов (4–23%)	[142]
Небраска, США	Камерный	Люцерна	63%	[143]
		Соя	7–13%	
Финляндия	Изотопный метод (¹³ C)	Двукисточник (камыш)	Не более 50%	[144]
Пушино	Субстрат-индуцированное дыхание в поле	Луг	41–50%	[135]
	Субстрат-индуцированное дыхание в лаборатории		35–40%	
	Раздельное инкубирование корней и почвы		42–57%	
–	–	Все типы	8–19%	[132]
–	–	Все типы	25%	[53]

Содержание микробной биомассы в почве преимущественно зависит от доли физической глины и ОВ, а также температуры, влажности, наличия минеральных элементов и загрязнений [145]. Доля микробного дыхания равна примерно 70% [64]. Например, для дерново-подзолистых почв южно-таежных экосистем она составляет 60.6% (метод интеграции компонентов) – 69.1% (субстрат-индуцированное дыхание) [146].

Дыхание корней и микроорганизмов может оцениваться не только по сравнению друг с другом, но и с другими потоками углерода. Например, в агроценозах доля гетеротрофного дыхания микроорганизмов составляет 10–40% от общего дыхания экосистемы, а доля дыхания корней – 20–40% от дыхания растения [147]. Дыхание микроорганизмов равно 44–52% от фотосинтеза [53]. Потери углерода при дыхании корней составляют 25% от уровня фотосинтеза и 13.5% от общего веса растений [148].

Заключение

Углеродные модели разделены на глобальные (углерод-азотные и многоэлементные) и экосистемные. Последние разбиты на углеродные (агроэкосистемные, фитоценоотические, эмиссии парниковых газов CO_2 и CH_4) и углерод-азотные (широкого спектра экосистем, лесные, микробиологические).

Среди основных сложностей применения математических методов для моделирования потоков углерода выделены многообразие методик расчета; высокие требования к входным данным; ограниченная доступность исходной информации; необходимость отражения климатических изменений; погрешности в описании функциональной зависимости эмиссии CO_2 от температуры.

Двоякая роль почвы как стока и источника парниковых газов, взаимодействие углеродного и азотного циклов, разделение пула почвенного органического углерода на фракции, а также соотношение микробного и корневого дыхания признаны основными проблемами количественной оценки компонентов биогеохимического цикла углерода.

Развитие моделей будет способствовать лучшему учету потоков парниковых газов, повышению точности оценки влияния на них климатических и антропогенных факторов, разработке стратегии снижения их эмиссии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН № 0148-2019-0009.

Литература

1. 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 / Ред. О. Эденхофер, 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. – Кембридж; Нью-Йорк: Университи Пресс, 2014. – 1435 с.
2. Полужтов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. – 390 с.

3. *Ольчев А.В.* Потоки CO₂ и H₂O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценка с применением математических моделей): Автореф. ... д-ра биол. наук. – М., 2015. – 51 с.
4. *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.
5. *Blagodatsky S.A., Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Richter J.* Microbial growth in soil and nitrogen turnover: Model calibration with laboratory data // *Soil Biol. Biochem.* – 1998. – V. 30, No 13. – P. 1757–1764. – doi: 10.1016/S0038-0717(98)00029-7.
6. *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 // *Ecol. Appl.* – 1999. – V. 9, No 3. – P. 913–919. – doi: 10.2307/2641338.
7. *Golubyatnikov L.L., Svirezhev Yu.M.* Life-cycle model of terrestrial carbon exchange // *Ecol. Modell.* – 2008. – V. 213, No 2. – P. 202–208. – doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.12.001.
8. *Tonitto C., Powell T.M.* Development of a spatial terrestrial nitrogen model for application to Douglas-fir forest ecosystems // *Ecol. Modell.* – 2006. – V. 193, No 3–4. – P. 340–362. – doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.08.041.
9. *Тарко А.М.* Модель биогеохимического цикла углерода и азота в лесной экосистеме // Регуляторная роль почвы в функционировании таежных экосистем / Отв. ред. Г.В. Добровольский. – М.: Наука, 2002. – С. 215–226.
10. *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* / Ed. R. Pearce. – N. Y.: Acad. Press, 2001. – P. 259–279.
11. *Володин Е.М.* Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 298–313.
12. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А.* Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Докл. РАН. – 2006. – Т. 407, № 3. – С. 400–404.
13. *Белюченко И.С., Смагин А.В., Попок Л.Б., Попок Л.Е.* Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании. – Краснодар: Куб. гос. аграр. ун-т, 2015. – 313 с.
14. *Солодянкина С.В., Черкашин А.К.* Геоинформационный анализ и моделирование геосистемных функций накопления углеродного запаса горно-таежными лесами Прибайкалья в изменяющейся природной среде // Вестн. НГУ. Сер. Информ. технологии. – 2011. – Т. 9, Вып. 1. – С. 44–55.
15. *Rosenstock T.S., Rufino M.C., Butterbach-Bahl K., Wollenberg E., Richards M.* (Eds.) *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture.* – Springer, 2016. – XV, 203 p. – doi: 10.1007/978-3-319-29794-1.
16. *Суховеева О.Э.* Моделирование потоков парниковых газов и циклов азота и углерода в почвах (обзор) // Журн. естественнoнауч. исслед. – 2017. – Т. 2, № 7. – С. 61–76.
17. *Cao M., Dent J.B., Heal O.W.* Modeling methane emissions from rice paddies // *Global Biogeochem. Cycles.* – 1995. – V. 9, No 2. – P. 193–195. – doi: 10.1029/94GB03231.
18. *Raich J.W., Potter C.S.* Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochem. Cycles.* – 1995. – V. 9, No 1. – P. 23–36. – doi: 10.1029/94GB02723.
19. *Tsuji G.Y., Uehara G., Balas S.* DSSAT v3. – Honolulu: Univ. of Hawaii, 1994. – 661 p.
20. *Gao L., Jin Z., Huan Y.* An Optimizing Decision-Making System for Rice Culture. – Beijing: China Agric. Sci. Technol. Press, 1992.

21. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // J. Atmos. Sci. – 1986. – V. 43, No 6. – P. 505–531. – doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2.
22. 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.
23. Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rayner J.H., Parry L.C. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted // INTECOL Bull. – 1987. – No 15. – P. 1–8.
24. 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 // J. Clime. – 2008. – V. 21, No 15. – P. 3776–3796. – doi: 10.1175/2008JCLI2038.1.
25. 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 // Ecol. Modell. – 2003. – V. 170. – P. 373–392.
26. 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 Biogeochem. Cycles. – 1993. – V. 7, No 4. – P. 785–809. – doi: 10.1029/93GB02042.
27. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // J. Geophys. Res. – 1992. – V. 97, No D9. – P. 9759–9776. – doi: 10.1029/92JD00509.
28. Grant R.F., Pattey E. Modelling variability in N₂O emissions from fertilized agricultural fields // Soil Biol. Biochem. – 2003. – V. 35, No 2. – P. 225–243. – doi: 10.1016/S0038-0717(02)00256-0.
29. 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 Biogeochem. Cycles. – 2010. – V. 24, No 1. – Art. GB1005, P. 1–13. – doi: 10.1029/2009GB003521.
30. 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 // Ecol. Modell. – 2017. – V. 345. – P. 125–139. – doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.
31. 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 // Ecol. Appl. – 1991. – V. 1. – P. 399–429. – doi: 10.2307/1941899.
32. Благодатский С.А. Микробная биомасса и моделирование цикла азота в почве. – Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Пушкино, 2011. – 51 с.
33. 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 No. NCAR/TN-275-+STR. – Boulder, Colo.: Natl. Cent. Atmos. Res., 1986. – 82 p. – doi: 10.5065/D6668B58.
34. Jain A.K., Kheshgi H.S., Wuebbles D.J. Integrated science model for assessment of climate change model // Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association, Cincinnati, OH (United States), 19–24 June 1994. – United States, 1994. – URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/10151110>.

35. Xu-Ri, Prentice I.C. Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model // *Global Change Biol.* – 2008. – V. 14, No 8. – P. 1745–1764. – doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01625.x.
36. Wania R., Meissner K.J., M. Eby M., Arora V.K., Ross I., Weaver A.J. Carbon-nitrogen feedbacks in the UVic ESCM // *Geosci. Model Dev.* – 2012. – V. 5, No 5. – P. 1137–1160. – doi: 10.5194/gmd-5-1137-2012.
37. Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биогеохимических циклов углерода и азота: Автореф. дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. – М., 1992. – 47 с.
38. Elzen den M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J. Modelling global biogeochemical cycles an integrated assessment approach: RIVM Report No. 461502007. – Bilthoven, the Netherlands: RIVM, 1995. – 137 p.
39. Крапивин В.Ф., Свирежев Ю.М., Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
40. Giltrap D.L., Li C., Saggar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils // *Agric. Ecosyst. Environ.* – 2010. – V. 136, No 3–4. – P. 292–300. – doi: 10.1016/j.agee.2009.06.014.
41. 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. – V. 5, No 1. – P. 73–94. – doi: 10.5194/bg-5-73-2008.
42. FACCE-JPI Projects Booklet: FACCE ERA-NET Plus, MACSUR and Multi-Partner Call on GHG Mitigation. – Brussels, Belgium: FACCE-JPI, 2017. – 42 p.
43. 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. – V. 81, No 1–2. – P. 153–225. – doi: 10.1016/S0016-7061(97)00087-6.
44. 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.
45. Марковская Г.К., Мельникова Н.А., Нечаева Е.Х. Влияние различных способов обработки почвы на ее биологическую активность в посевах яровой пшеницы // *Аграр. науч. журн.* – 2014. – № 2. – С. 22–25.
46. Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. – М.: Наука, 2015. – 198 с.
47. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // *Агрохимия.* – 2011. – № 12. – С. 53–63.
48. 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, No 1–2. – P. 130–154. – doi: 10.1016/j.geoderma.2004.12.020.
49. Авксентьев А.А. Эмиссия парниковых газов (CO₂, N₂O, CH₄) черноземом обыкновенным Каменной степи: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Воронеж, 2011. – 21 с.
50. Гончарова О.Ю., Телеснина В.М. Биологическая активность постагрогенных почв (на примере Московской области) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение.* – 2010. – № 4. – С. 24–31.

51. 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.
52. Стольникова Е.В. Микробная биомасса, ее структура и продуцирование парниковых газов почвами разного землепользования: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Пушкино, 2010. – 25 с.
53. 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 / Ed. by R. Lal, J. Kimble, E. Levine, B.A. Stewart. – Boca Raton, London, Tokyo: Lewis Publ., 1995. – P. 25–40.
54. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change // Geoderma. – 2004. – V. 123, No 1–2. – P. 1–22. – doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
55. 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.
56. Хохлов В.Г. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – М., 1980. – 16 с.
57. Шихова Л.Н., Лисицын Е.М. Динамика содержания и запасов углерода гумуса в пахотных подзолистых почвах подзоны южной тайги Кировской области // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2014. – Вып. 2. – С. 7–13.
58. 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.
59. Зинякова Н.Б. Активное органическое вещество в серой лесной почве при органической и минеральной системах удобрения: Дис. ... канд. биол. наук. – Пушкино, 2014. – 167 с.
60. Безуглова О.С., Юдина Н.В. Взаимосвязь физических свойств и гумусированности в черноземах юга Европейской России // Почвоведение. – 2006. – № 2. – С. 211–219.
61. МГЭИК, 2006: Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Приложение 2. Сводка уравнений. МГЭИК, 2006. Подготовлено программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов / Ред. Х.С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе. – Хаяма, Япония: ИГЕС, 2006. – 37 с.
62. 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. – V. 9, No 12. – P. 5125–5142. – doi: 10.5194/bg-9-5125-2012.
63. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Klein Goldewijk K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A. M., Ono T., Peregon A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. Global Carbon Budget 2019. // Earth Syst. Sci. Data. – 2019. – V. 11, No 4. – P. 1783–1838. – doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.

64. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Отв. ред. Г.А. Заварзин. – М.: Наука, 2007. – 315 с.
65. *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., Lisovoi N.V.* Projected changes in the organic carbon stocks of croplands mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990–2070 // *Global Change Biol.* – 2007. – V. 13, No 2. – P. 342–356. – doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01297.x.
66. *Солодянкина С.В., Черкашин А.К.* Экономическая ГИС-оценка растительного потенциала нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа в ландшафтах юга Восточной Сибири // *Вестн. НГУ. Сер. Информ. технологии.* – 2014. – Т. 12, Вып. 2. – С. 99–108.
67. *Наумов А.В.* Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Новосибирск, 2003. – 39 с.
68. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А.* Абиотические факторы дыхания почв // *Экол. вестн. Северного Кавказа.* – 2010. – Т. 6, № 1. – С. 5–13.
69. *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 // *Agric. For. Meteorol.* – 2014. – V. 198–199. – P. 335–346. – doi: 10.1016/j.agrformet.2014.08.020.
70. Estimation of emissions from agriculture. United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/SBSTA/2004/INF.4. – Bonn: UNFCCC, 2004. – 20 p. – URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf04.pdf>.
71. *Чертков О.Г., Надпорожская М.А.* Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2016. – Т. 8, № 2. – С. 391–399.
72. *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 Biochem. Cycles.* – 2003. – V. 17, No 4. – Art. 1107, P. 1–10. – doi: 10.1029/2003GB002046.
73. *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 // *Ecol. Modell.* – 2014. – V. 292. – P. 51–62. – doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.
74. *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 // *Eur. J. Agron.* – 2012. – V. 37, No 1. – P. 83–95. – doi: 10.1016/j.eja.2011.11.005.
75. *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/ImpactofClimateChangeonRiceYieldsDec2012.pdf.
76. *Суховеева О.Э., Карелин Д.В.* Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на Европейской территории России // *Вестн. С.-Петерб. ун-та. Науки о Земле.* – 2019. – Т. 64, Вып. 2. – С. 363–384. – doi: 10.21638/spbu07.2019.211.
77. *Müller C., Bondeau A., Popp A., Waha K., Fader M.* Climate change impacts on agricultural yields: Background note to the world development report. – Washington, DC: World Bank, 2010. – 12 p. – URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9065>.
78. *Cantelaube P., Terres J.M.* Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe // *Tellus.* – 2005. – V. 57, No 3. – P. 476–487.

79. Oettli P., Sultan B., Baron C., Vrac M. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? // *Environ. Res. Lett.* – 2011. – V. 6. No 1. – Art. 014008, P. 1–9. – doi: 10.1088/1748-9326/6/1/014008.
80. Суховеева О.Э. Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ в агроландшафтах Европейской территории России на основе имитационного моделирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М., 2018. – 27 с.
81. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / Под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. – Саратов: Амирит, 2017. – 279 с.
82. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2005. – 232 с.
83. Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q₁₀ // *Global Change Biol.* – 2006. – V. 12, No 2. – P. 154–164. – doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x.
84. Алексеева А.А., Фомина Н.В. Анализ активности редуцирующих ферментов агрогенно измененных почв лесных питомников лесостепной зоны Красноярского края // *Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та.* – 2015. – № 1. – С. 32–35.
85. Kirschbaum M.U.F., Mueller R. Net Ecosystem Exchange. – Australia: Coop. Res. Cent. Greenhouse Account., 2001. – 139 p.
86. 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.
87. WMO Greenhouse Gas Bulletin. – WMO, 2012. – No 8: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011. – 8 p.
88. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Глобальные изменения климата и цикличность вулканической активности. – Burgas, Bulgaria: SWB, 2008. – 301 с.
89. WMO Greenhouse Gas Bulletin. – WMO, 2011. – No 7: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2010. – 8 p.
90. WMO Greenhouse Gas Bulletin. – WMO, 2018. – No 14: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. – 8 p.
91. Заварзин Г.А., Васильева Л.В. Цикл метана на территории России // *Круговорот углерода на территории России* / Под ред. Н.П. Лаверова, Г.А. Заварзина. – М., 1999. – С. 202–230.
92. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH₄ и CO₂ на болотах России // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата.* – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 1–53.
93. Miltner A., Kopinke F.D., Kindler R., Selesi D., Hartmann A., Kästner M. Non-photosynthetic CO₂ fixation by soil microorganisms // *Plant and Soil.* – 2005. – V. 269, No 1–2. – P. 193–203. – doi: 10.1007/s11104-004-0483-1.
94. Šantrůčková H., Bird M.I., Elhottová D., Novák J., Pícek T., Šimek M., Tykva R. Heterotrophic fixation of CO₂ in soil // *Microb. Ecol.* – 2005. – V. 49, No 2. – P. 218–225.
95. Смагин А.В. Газовая функция почв // *Почвоведение.* – 2000. – № 10. – С. 1211–1223.
96. Shimmel S.M. Dark fixation of carbon dioxide in an agricultural soil // *Soil Sci.* – 1987. – V. 144, No 1. – P. 20–23.
97. Abohassan R.A. Carbon dynamics in a temperate agroforestry system in Southern Ontario, Canada: PhD Thesis. – Guelph, Canada: Univ. of Guelph, 2004. 122 p.

98. *Le Mer J., Roger P.* Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review // *Eur. J. Soil Biol.* – 2001. – V. 37, No 1. – P. 25–50. – doi: 10.1016/S1164-5563(01)01067-6.
99. *Kammann C., Hepp S., Lenhart K., Müller C.* Stimulation of methane consumption by endogenous CH₄ production in aerobic grassland soil // *Soil Biol. Biochem.* – 2009. – V. 41, No 3. – P. 622–629. – doi: 10.1016/j.soilbio.2008.12.025.
100. *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 // *Theor. Appl. Climatol.* – 2007. – V. 89, No 1–2. – P. 9–24. – doi: 10.1007/s00704-006-0260-6.
101. *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 Biogeochem. Cycles.* – 2001. – V. 15. – P. 183–206. – doi: 10.1029/2000GB001298.
102. *Zavalishin N.N.* Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems // *Ecol. Modell.* – 2008. – V. 213, No 1. – P. 16–32. – doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.12.006.
103. *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* / Отв. ред. В.Н. Кудяров. – М.: Наука, 2006. – С. 362–377.
104. *Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеев А.В.* Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2013. Т. 49, № 3. – С. 255–270.
105. *Elzen M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J.* An integrated modeling approach to global carbon and nitrogen cycles: Balancing their budgets // *Global Biogeochem. Cycles.* – 1997. – V. 11, No 2. – P. 191–215. – doi: 10.1029/96GB03938.
106. *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.
107. *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 Biogeochem. Cycles.* – 2007. – V. 21, No 4. – Art. GB4018, P. 1–15. – doi: 10.1029/2006GB002868.
108. *Gerber S., Hedin L.O., Oppenheimer M., Pacala S.W., Shevliakova E.* Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model // *Global Biogeochem. Cycles.* – 2010. – V. 24, No 1. – Art. GB1001, P. 1–15. – doi: 10.1029/2008GB003336.
109. *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 Biogeochem. Cycles.* – 2009. – V. 23, No 4. – Art. GB4028, P. 1–13. – doi: 10.1029/2009GB003474.
110. *Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K., Moore J.K., Mahowald N., Randerson J.T., Fung I., Lamarque J.F., Feddema J.J., Lee Y.H.* Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model // *Biogeosciences.* – 2009. – V. 6, No 10. – P. 2099–2120. – doi: 10.5194/bg-6-2099-2009.
111. *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.

112. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А. Гумусообразование и агрономическая оценка органического вещества почв. – М.: Агроконсалт, 1997. – 82 с.
113. 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 // J. Sci. Food Agric. – 2014. – V. 94, No 12. – P. 2362–2371. – doi: 10.1002/jsfa.6577.
114. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В. Измерение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрохимия. – 2009. – № 5. – С. 5–12.
115. Дегтярев В.В., Панасенко О.С., Недбаев В.Н. Содержание коллоидных форм гумуса в структурных агрегатах черноземов типичных при различных условиях лесостепи Украины // Вестн. Курск. гос. с.-х. акад. – 2013. – № 5. – С. 60–62.
116. Чупрова В.В. Минерализуемый пул органического вещества в агрочерноземах юга Средней Сибири // Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та. – 2013. – № 9. – С. 83–89.
117. 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.
118. Кузнецова Т.В., Удальцов С.Н., Демкин В.А. Минерализация активного органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2013. – Т. 18, Вып. 3. – С. 978–981.
119. Козут 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. – doi: 10.7868/S0032180X1601007X.
120. Цыбулько Н.Н., Шапшеева Т.П., Арастович Т.В., Зайцев А.А. Минерализационная способность органического вещества торфяных почв и поступление ¹³⁷Cs в многолетние злаковые травы // Мелиорация. – 2010. – № 2. – С. 109–122.
121. Muller T., Hoper H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: Consequences for model application // Soil Biol. Biochem. – 2004. – V. 36, No 6. – P. 877–888. – doi: 10.1016/j.soilbio.2003.12.015.
122. Schwendenmann L., Pendal E. Response of organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation // Biol. Fertil. Soils. – 2008. – V. 44, No 8. – P. 1053–1062. – doi: 10.1007/s00374-008-0294-2.
123. 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.
124. Bond-Lamberty B., Thompson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // Nature. – 2010. – V. 464. – P. 579–582. – doi: 10.1038/nature08930.
125. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // Soil Biol. Biochem. – 2006. – V. 38, No 3. – P. 425–448. – doi: 10.1016/j.soilbio.2005.08.020.
126. Luo Y., Zhou X. Soil Respiration and the Environment. – Burlington: Acad. Press, 2006. – 316 p.
127. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // Global Change Biol. – 2002. – V. 8, No 8. – P. 800–812. – doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x.
128. Степанов А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. – М.: ГЕОС, 2011. – 192 с.
129. Bardgett R.D. Plant-soil interactions in a changing world // Biol. Rep. – 2011. – V. 3. – Art. 16, P. 1–6. – doi: 10.3410/B3-16.

130. Ларионова А.А., Сапронов Д.В., Лопес де Гереню В.О., Кузнецова Л.Г., Кудяров В.Н. Вклад дыхания корней растений в эмиссию CO₂ из почвы // Почвоведение. – 2006. – № 10. – С. 1248–1257.
131. Заварзин Г.А., Кудяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестн. РАН. – 2006. – Т. 76, № 1. – С. 14–29.
132. Сапронов Д.В., Кузяков Я.В. Разделение корневого и микробного дыхания: сравнение трех методов // Почвоведение. – 2007. – № 7. – С. 862–872.
133. Кузяков Я.В., Ларионова А.А. Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию CO₂ из почвы (обзор) // Почвоведение. – 2006. – № 7. – С. 842–854.
134. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Пушкино, 2010. – 48 с.
135. 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.
136. 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. – doi: 10.1023/A:1006244819642.
137. Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес Де Гереню В.О. Дыхание корней и его вклад в эмиссию CO₂ из почвы // Почвоведение. – 2003. – № 2. – С. 183–194.
138. 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 // Huan Jing Ke Xue. – 2004. – V. 25, No 3. – P. 1–6. (на кит. яз.)
139. Swinnen J. Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil // Plant Soil. – 1994. – V. 165, No 1. – P. 89–101. – doi: 10.1007/BF00009966.
140. Сапронов Д.В. Многолетняя динамика эмиссии CO₂ из серых лесных и дерново-подзолистых почв: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Пушкино, 2008. – 20 с.
141. 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.
142. 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. – С. 1086–1094.
143. Da Costa J.M.N. Respiratory releases of carbon dioxide by aerial parts and roots of field-grown alfalfa and soybeans: PhD Thesis. – Lincoln: Univ. of Nebraska, 1983. – 125 p.
144. 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 Env. Res. – 2012. – V. 17, No 3–4. – P. 184–192.
145. Орлова О.В. Активное органическое вещество как регулятор процессов трансформации азота и углерода в дерново-подзолистых почвах: Автореф. ... д-ра биол. наук. – СПб., 2013. – 48 с.
146. 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.

147. 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 // *Agricult. Forest Meteorol.* – 2011. – V. 151, No 5. – P. 633–643. – doi: 10.1016/j.agrformet.2011.01.012.
148. Sadras V.O., Calderini D. Crop physiology: application for genetic improvements and agronomy. – Burlington, MA, USA: Acad. Press, 2009. – 581 p.

Поступила в редакцию
12.12.2019

Суховеева Ольга Эдуардовна, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории антропогенных изменений климатической системы

Институт географии РАН

Старомонетный пер., 29, стр. 4, г. Москва, 119017, Россия

E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2020, vol. 162, no. 3, pp. 473–501

doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.473-501

Problems of Modelling Carbon Biogeochemical Cycle in Agricultural Landscapes

O.E. Sukhoveeva

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Received December 12, 2019

Abstract

The research is focused on the carbon cycle features in soil that are formed under agricultural land use and should be taken into account for mathematical simulation, including assessments of greenhouse gases emissions and specific carbon balance in arable soils. A classification of carbon models was developed; global (carbon-nitrogen and multi-element) and ecosystem models were singled out. The latter ones fall into carbon cycle models (agroecosystem, phytocenosis, and greenhouse gases (CO₂ and CH₄) emissions) and carbon-nitrogen cycle models (various ecosystems, forest, and microbiological). The following difficulties arising when mathematical methods are used for description of the carbon cycle were discussed: multiple methods of calculation; high requirements to input data; limited availability of input information; necessity to consider climate change; errors in description of the functional dependence of CO₂ emission on temperature. The challenges of quantitative evaluation of components of the carbon biogeochemical cycle were analyzed, i.e., the dual role of soil both as a carbon stock and a source of carbon compounds, which are greenhouse gases, as well as the interaction of carbon and nitrogen cycles, separation of the pool of soil organic carbon into fractions, and the ratio of microbial and root respirations. Further development of the obtained models will help to better assess greenhouse gases fluxes, to properly determine the effect of climatic and anthropogenic factors on them, and to create a strategy for reducing their emissions.

Keywords: agroecosystems, anthropogenic impact, biogeochemical cycles, soil respiration, climate change, simulation modelling, carbon sources and stocks, greenhouse gases, soil organic matter, soil organic carbon, agriculture, carbon models, carbon dioxide emission

Acknowledgements. The study was performed as part of state assignment no. 0148-2019-0009 to the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences.

References

1. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow Ch., Zwickel T., Minx J.C. (Eds.). Cambridge, New York, Cambridge Univ. Press, 2014. 1435 p.
2. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. *Modeli produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Modelling the Production Process of Agricultural Crops]. St. Petersburg, Izd. S.-Petersb. Univ., 2011. 390 p. (In Russian)
3. Ol'chev A.V. Fluxes of CO₂ and H₂O in forest ecosystems under climate change conditions (evaluation by using mathematical models). *Extended Abstract of Doc. Biol. Sci. Diss.* Moscow, 2015. 51 p. (In Russian)
4. Pripitina I.V., Frolova G.G., Shanin V.N. Substantiation of optimum planting schemes for forest plantations: A computer experiment. *Komp'yut. Issled. Model.*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 333–343. (In Russian)
5. Blagodatsky S.A., Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Richter J. Microbial growth in soil and nitrogen turnover: Model calibration with laboratory data. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, vol. 30, no. 13, pp. 1757–1764. doi: 10.1016/S0038-0717(98)00029-7.
6. 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. *Ecol. Appl.*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 913–919. doi: 10.2307/2641338.
7. Golubyatnikov L.L., Svirezhev Yu.M. Life-cycle model of terrestrial carbon exchange. *Ecol. Modell.*, 2008, vol. 213, no. 2, pp. 202–208. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.12.001.
8. Tonitto C., Powell T.M. Development of a spatial terrestrial nitrogen model for application to Douglas-fir forest ecosystems. *Ecol. Modell.*, 2006, vol. 193, nos. 3–4, pp. 340–362. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.08.041.
9. Tarko A.M. A model of the carbon and nitrogen biogeochemical cycle in forest ecosystem. In: *Regulyatornaya rol' pochvy v funktsionirovanii taezhnykh ekosistem* [The Regulatory Role of Soil in the Functioning of Taiga Ecosystems]. Dobrovol'skii G.V. (Ed.). Moscow, Nauka, 2002, pp. 215–226. (In Russian)
10. 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. In: Pearce R. (Ed.) *Meteorology at the Millennium*. New York, Acad. Press, 2001, pp. 259–279.
11. Volodin E.M. Atmosphere-ocean general circulation model with the carbon cycle. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2007, vol. 43, no.3, pp. 266–280. doi: 10.1134/S0001433807030024.
12. Mokhov I.I., Eliseev A.V., Karpenko A.A. Sensitivity of the IFA RAN Global Climatic Model with an interactive carbon cycle to anthropogenic influence. *Dokl. Earth Sci.*, 2006, vol. 407, no. 2, pp. 424–428. doi: 10.1134/S1028334X06030172.
13. Belyuchenko I.S., Smagin A.V., Popok L.B., Popok L.E. *Analiz dannykh i matematicheskoe modelirovanie v ekologii i prirodopol'zovanii* [Data Analysis and Mathematical Modelling in Ecology and Nature Management]. Krasnodar, Izd. Kuban. Gos. Agrar. Univ., 2015. 313 p. (In Russian)
14. Solodyankina S.V., Cherkashin A.K. Geoinformation analysis and modelling of geosystem functions of carbon stock accumulation in mountain forests of the Baikal region in the changing environment. *Vestn. NGU. Ser. Inf. Tekhnol.*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 44–55. (In Russian)
15. Rosenstock T.S., Rufino M.C., Butterbach-Bahl K., Wollenberg E., Richards M. (Eds.) *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. Springer, 2016. XV, 203 p. doi: 10.1007/978-3-319-29794-1.
16. Sukhoveeva O.E. Modelling of greenhouse gases fluxes and cycles of carbon and nitrogen in soils (overview). *Zh. Estestvennonauchn. Issled.*, 2017, vol. 2, no. 7, pp. 61–76. (In Russian)
17. Cao M., Dent J.B., Heal O.W. Modeling methane emissions from rice paddies. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, vol. 9, no. 2, pp. 193–195. doi: 10.1029/94GB03231.
18. Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, vol. 9, no. 1, pp. 23–36. doi: 10.1029/94GB02723.
19. Tsuji G.Y., Uehara G., Balas S. *DSSAT v3*. Honolulu, Univ. of Hawaii, 1994. 661 p.

20. Gao L., Jin Z., Huan Y. *An Optimizing Decision-Making System for Rice Culture*. Beijing, China Agric. Sci. Technol. Press, 1992.
21. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, vol. 43, no. 6, pp. 505–531. doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2.
22. 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.
23. Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rayner J.H., Parry L.C. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *INTECOL Bull.*, 1987, no. 15, pp. 1–8.
24. 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. *J. Clim.*, 2008, vol. 21, no. 15, pp. 3776–3796. doi: 10.1175/2008JCLI2038.1.
25. 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. *Ecol. Modell.*, 2003, vol. 170, pp. 373–392.
26. 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 Biogeochem. Cycles*, 1993, vol. 7, no. 4, pp. 785–809. doi: 10.1029/93GB02042.
27. Li C., Frolking S., Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, no. D9, pp. 9759–9776. doi: 10.1029/92JD00509.
28. Grant R.F., Pattey E. Modelling variability in N₂O emissions from fertilized agricultural fields. *Soil Biol. Biochem.*, 2003, vol. 35, no. 2, pp. 225–243. doi: 10.1016/S0038-0717(02)00256-0.
29. 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 Biogeochem. Cycles*, 2010, vol. 24, no. 1, art. GB1005, pp. 1–13. doi: 10.1029/2009GB003521.
30. Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnic P., Pripitina 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. *Ecol. Modell.*, 2017, vol. 345, pp. 125–139. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.
31. 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. *Ecol. Appl.*, 1991, vol. 1, pp. 399–429. doi: 10.2307/1941899.
32. Blagodatsky S.A. Microbial biomass and modelling nitrogen cycle in soil. *Extended Abstract of Doct. Biol. Sci. Diss.* Pushchino, 2011. 51 p. (In Russian)
33. 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 No. NCAR/TN-275+STR*. Boulder, Colo., Natl. Cent. Atmos. Res., 1986. 82 p. doi: 10.5065/D6668B58.
34. Jain A.K., Kheshgi H.S., Wuebbles D.J. Integrated science model for assessment of climate change model. *Proc. Annu. Meet. Exhib. Air Waste Manage. Assoc., Cincinnati, OH (United States), June 19–24, 1994*. United States, 1994. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/10151110>.
35. Xu-Ri, Prentice I.C. Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.*, 2008, vol. 14, no. 8, pp. 1745–1764. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01625.x.
36. Wania R., Meissner K.J., M. Eby M., Arora V.K., Ross I., Weaver A.J. Carbon-nitrogen feedbacks in the UVic ESCM. *Geosci. Model Dev.*, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 1137–1160. doi: 10.5194/gmd-5-1137-2012.
37. Tarko A.M. Mathematical modelling of global biogeochemical cycles of carbon and nitrogen. *Extended Abstract of Doct. Phys.-Math. Sci. Diss.* Moscow, 1992. 47 p. (In Russian)
38. Elzen den M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J. Modelling global biogeochemical cycles an integrated assessment approach. *RIVM Report No. 461502007*. Bilthoven, the Netherlands, RIVM, 1995. 137 p.
39. Krapivin V.F., Svirezhev Yu.M., Tarko A.M. *Matematicheskoe modelirovanie global'nykh biosfernykh protsessov* [Mathematical Modelling of Global Biospheric Processes]. Moscow, Nauka, 1982. 272 p. (In Russian)

40. Giltrap D.L., Li C., Saggar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 2010, vol. 136. nos. 3–4, pp. 292–300. doi: 10.1016/j.agee.2009.06.014.
41. 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, vol. 5, no. 1, pp. 73–94. doi: 10.5194/bg-5-73-2008.
42. *FACCE-JPI Projects Booklet: FACCE ERA-NET Plus, MACSUR and Multi-Partner Call on GHG Mitigation*. Brussels, Belgium, FACCE-JPI, 2017. 42 p.
43. 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., Thomley 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, vol. 81, nos. 1–2, pp. 153–225. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00087-6.
44. Larionova A.A., Kurganova I.N., de Gerenyu V.O.L., Zolotareva B.N., Yevdokimov I.V., Kudryavtsev V.N. Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes. *Eurasian Soil Sci.*, 2010, vol. 43, no. 2, pp. 168–176. doi: 10.1134/S1064229310020067.
45. Markovskaya G.K., Mel'nikova N.A., Nechaeva E.Kh. Biological activity of soil treated by different methods during spring wheat cultivation. *Agrar. Nauchn. Zh.*, 2014, no. 2, pp. 22–25. (In Russian)
46. Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. *Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovanie i upravlenie* [Agrolandscapes of Central Chernozem Zone: Zonation and Management]. Moscow, Nauka, 2015. 198 p. (In Russian)
47. Semenov V.M., Tulina A.S. Comparison of mineralized pool of organic matter in soils of natural and agricultural ecosystems. *Agrokimiya*, 2011, no. 12, pp. 53–63. (In Russian)
48. 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. vol. 128, nos. 1–2, pp. 130–154. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.12.020.
49. Avksent'ev A.A. Greenhouse gas emissions (CO₂, N₂O, CH₄) by ordinary chernozem of the Stone Steppe. *Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. Diss.* Voronezh, 2011. 21 p. (In Russian)
50. Goncharova O.Yu., Telesnina V.M. The biological activities of post-agrogenic soils (based on an example from the Moscow region). *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.*, 2010, vol. 65, no. 4, pp. 159–167. doi: 10.3103/S0147687410040058.
51. Gedgafova F.V., Uligova T.S., Gorobtsova O.N., Tembotov R.Kh. The biological activity of chernozems in the Central Caucasus Mountains (Terskii variant of altitudinal zonality), Kabardino-Balkaria. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 1341–1348. doi: 10.1134/S1064229315120078.
52. Stol'nikova E.V. Microbial biomass, its structure and greenhouse gases production by soils under different land use. *Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. Diss.* Pushchino, 2010. 25 p. (In Russian)
53. 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. In: Lal R., Kimble J., Levine E., Stewart B.A. (Eds.) *Soil Management and Greenhouse Effect*. Boca Raton, London, Tokyo, Lewis Publ., 1995, pp. 25–40.
54. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, vol. 123. nos. 1–2, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
55. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Tulina A.S. Mineralization of organic matter and the carbon sequestration capacity of zonal soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2008, vol. 41, no. 7, pp. 717–730. doi: 10.1134/S1064229308070065.
56. Khokhlov V.G. Organic matter of sod-podzolic soils in the Smolensk region. *Extended Abstract of Cand. Agric. Sci. Diss.* Moscow, 1980. 16 p. (In Russian)
57. Shikhova L.N., Lisitsyn E.M. Carbon content and stock dynamics in humus of arable podzolic soils of the south taiga subzone in the Kirov region. *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2014, no. 2, pp. 7–13. (In Russian)
58. Zavyalova N.E., Mitrofanova E.M., Kazakova I.V. Mineral fertilizers and lime influence on the content of active elements in the organic matter of sod-podzolic soil and spring wheat yield. *Dostizh. Nauki Tekh. APK*, 2013, no. 11, pp. 19–20. (In Russian)

59. Zinyakova N.B. Active organic matter in gray forest soil under organic and mineral fertilization systems. *Cand. Biol. Sci. Diss.* Pushchino, 2014. 167 p. (In Russian)
60. Bezuglova O.S., Yudina N.V. Interrelationship between the physical properties and the humus content of chernozems in the south of European Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 187–194. doi: 10.1134/S1064229306020098.
61. IPCC, 2006: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds.). Hayama, IGES, 2006. 37 p.
62. 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, vol. 9, no. 12, pp. 5125–5142. doi: 10.5194/bg-9-5125-2012.
63. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Klein Goldewijk K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A. M., Ono T., Peregon A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.
64. Zavarzin G.A. (Ed.) *Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* [Carbon Pools and Fluxes in Russian Terrestrial Ecosystems]. Moscow, Nauka, 2007. 315 p. (In Russian)
65. 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., Lisovoi N.V. Projected changes in the organic carbon stocks of croplands mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990–2070. *Global Change Biol.*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 342–356. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01297.x.
66. Solodyankina S.V., Cherkashin A.K. Economic GIS assessment of the vegetation capacity for neutralization of anthropogenic emissions of carbon dioxide in the south of Eastern Siberia. *Vestn. NGU. Ser. Inf. Tekhnol.*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 99–108. (In Russian)
67. Naumov A.V. Soil respiration: Constituents, ecological functions, geographical patterns. *Extended Abstract of Doct. Biol. Sci. Diss.* Novosibirsk, 2003. 39 p. (In Russian)
68. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Shcherba T.I., Shnyrev N.A. Abiotic factors of soil respiration. *Ekol. Vestn. Sev. Kavk.*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 5–13. (In Russian)
69. 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. *Agric. For. Meteorol.*, 2014, vol. 198–199, pp. 335–346. doi: 10.1016/j.agrformet.2014.08.020.
70. *Estimation of emissions from agriculture. United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/SBSTA/2004/INF.4*. Bonn, UNFCCC, 2004. 20 p. Available at: <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf04.pdf>.
71. Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A. Models of soil organic matter dynamics: Problems and prospects. *Komp'yut. Issled. Model.*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 391–399. (In Russian)
72. 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 Biochem. Cycles*, 2003, vol. 17, no. 4, art. 1107, pp. 1–10. doi: 10.1029/2003GB002046.
73. 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. *Ecol. Modell.*, 2014, vol. 292, pp. 51–62. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.
74. 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. *Eur. J. Agron.*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 83–95. doi: 10.1016/j.eja.2011.11.005.

75. Tazhibayeva K., Townsend R. *The Impact of Climate Change on Rice Yields: Heterogeneity and Uncertainty: Working Paper*. Cambridge, 2012. 47 p. Available at: http://www.robertmtownsend.net/sites/default/files/files/papers/working_papers/ImpactofClimateChangeonRiceYieldsDec2012.pdf.
76. Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Parametrization of the DNDC model for evaluating components of the carbon biogeochemical cycle in the European part of Russia. *Vestn. S.-Peterb. Univ. Nauki Zemle*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 363–384. doi: 10.21638/spbu07.2019.211. (In Russian)
77. Müller C., Bondeau A., Popp A., Waha K., Fader M. *Climate Change Impacts on Agricultural Yields: Background Note to the World Development Report*. Washington, DC, World Bank, 2010. 12 p. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9065>.
78. Cantelaube P., Terres J.M. Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe. *Tellus*, 2005, vol. 57, no. 3, pp. 476–487.
79. Oetli P., Sultan B., Baron C., Vrac M. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, no. 1, art. 014008, pp. 1–9. doi: 10.1088/1748-9326/6/1/014008.
80. Sukhoveeva O.E. Evaluation of spatiotemporal variability of CO₂ fluxes in agrolandscapes of the European Russia using simulation modelling. *Extended Abstract of Cand. Geogr. Sci. Diss.* Moscow, 2018. 27 p. (In Russian)
81. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Gitsarskii M.L., Blinov V.G. (Eds.) *Monitoring potokov parnikovykh gazov v prirodnykh ekosistemakh* [Monitoring Greenhouse Gases Fluxes in Natural Ecosystems]. Saratov, Amirit, 2017. 279 p. (In Russian)
82. Tarko A.M. *Antropogennye izmeneniya global'nykh biosfernykh protsessov. Matematicheskoe modelirovanie* [Anthropogenic Changes in Global Biospheric Processes. Mathematical Modelling]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 232 p. (In Russian)
83. Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biol.*, 2006, vol. 12, no. 2, pp. 154–164. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x.
84. Alekseeva A.A., Fomina N.V. Analysis of the reducing enzyme activity of agrogenically disturbed soils in the nursery forests of the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk region. *Vestn. Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ.*, 2015, no. 1, pp. 32–35. (In Russian)
85. Kirschbaum M.U.F., Mueller R. *Net Ecosystem Exchange*. Australia, Coop. Res. Cent. Greenhouse Account., 2001. 139 p.
86. Zadorozhnyi A.N., Semenov M.V., Khodzhaeva A.K., Semenov V.M. Soil processes of production, consumption, and emission of greenhouse gases. *Agrokimiya*, 2010, no. 10, pp. 75–92. (In Russian)
87. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. WMO, 2012, no. 8: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2011. 8 p.
88. Khain V.E., Khalilov E.N. *Global'nye izmeneniya klimata i tsiklichnost' vulkanicheskoi aktivnosti* [Global Climate Changes and Volcanic Activity Cycles]. Burgas, Bulgaria, SWB, 2008. 301 p. (In Russian)
89. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. WMO, 2011, no. 7: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2010. 8p.
90. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. WMO, 2018, no. 14: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. 8 p.
91. Zavarzin G.A., Vasil'eva L.V. Methane cycle in the territory of Russia. In: Laverov N.P., Zavarzin G.A. (Eds.) *Krugovorot ugleroda na territorii Rossii* [Carbon Cycle in the Territory of Russia]. Moscow, 1999, pp. 202–230. (In Russian)
92. Glagolev M.V. Annotated list of literature sources on the results of CH₄ and CO₂ flux measurements in Russian marshlands. *Din. Okruzh. Sredy Global'nye Izmen. Klim.*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 1–53. (In Russian)
93. Miltner A., Kopinke F.D., Kindler R., Selesi D., Hartmann A., Kästner M. Non-phototrophic CO₂ fixation by soil microorganisms. *Plant Soil*, 2005, vol. 269, nos. 1–2, pp. 193–203. doi: 10.1007/s11104-004-0483-1.

94. Šantrůčková H., Bird M.I., Elhottová D., Novák J., Pícek T., Šimek M., Tykva R. Heterotrophic fixation of CO₂ in soil. *Microb. Ecol.*, 2005, vol. 49, no. 2, pp. 218–225.
95. Smagin A.V. The gas function of soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2000, vol. 33, no. 10, pp. 1061–1071.
96. Shimmel S.M. Dark fixation of carbon dioxide in an agricultural soil. *Soil Sci.*, 1987, vol. 144, no. 1, pp. 20–23.
97. Abohassan R.A. Carbon dynamics in a temperate agroforestry system in Southern Ontario, Canada. *PhD Thesis*. Guelph, Canada, Univ. of Guelph, 2004. 122 p.
98. Le Mer J., Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.*, 2001, vol. 37, no. 1, pp. 25–50. doi: 10.1016/S1164-5563(01)01067-6.
99. Kammann C., Hepp S., Lenhart K., Müller C. Stimulation of methane consumption by endogenous CH₄ production in aerobic grassland soil. *Soil Biol. Biochem.*, 2009, vol. 41, no. 3, pp. 622–629. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.12.025.
100. 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. *Theor. Appl. Climatol.*, 2007, vol. 89, nos. 1–2, p. 9–24. doi: 10.1007/s00704-006-0260-6.
101. 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 Biogeochem. Cycles*, 2001, vol. 15, pp. 183–206. doi: 10.1029/2000GB001298.
102. Zavalishin N.N. Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems. *Ecol. Modell.*, 2008, vol. 213, no. 1, pp. 16–32. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.12.006.
103. Komarov A.S., Pripulina I.V., Mikhailov A.V., Chertov O.G. Carbon biogeochemical cycle in forest ecosystems of the central part of European Russia and its anthropogenic changes. In: *Pochvennyye protsessy i prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochv* [Soil Processes and Spatiotemporal Organization of Soils]. Kudryarov V.N. (Ed.). Moscow, Nauka, 2006. pp. 362–377. (In Russian)
104. Golubyatnikov L.L., Mokhov I.I., Eliseev A.V. Nitrogen cycle in the earth climatic system and its modeling. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 229–243. doi: 10.1134/S0001433813030079.
105. Elzen M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J. An integrated modeling approach to global carbon and nitrogen cycles: Balancing their budgets. *Global Biogeochem. Cycles*, 1997, vol. 11, no. 2, pp. 191–215. doi: 10.1029/96GB03938.
106. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. *Bioticheskie krugovoroty na pyati kontinentakh: azot i zol'nye elementy v prirodnykh nazemnykh ekosistemakh* [Biotic Turnover on Five Continents: Nitrogen and Ash Elements in Natural Terrestrial Ecosystems]. Novosibirsk, Izd. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2008. 381 p. (In Russian)
107. 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 Biogeochem. Cycles*, 2007, vol. 21, no. 4, art. GB4018, pp. 1–15. doi: 10.1029/2006GB002868.
108. Gerber S., Hedin L.O., Oppenheimer M., Pacala S.W., Shevliakova E. Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model. *Global Biogeochem. Cycles*, 2010, vol. 24, no. 1, art. GB1001, pp. 1–15. doi: 10.1029/2008GB003336.
109. 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 Biogeochem. Cycles*, 2009, vol. 23, no. 4, art. GB4028, pp. 1–13. doi: 10.1029/2009GB003474.
110. 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, vol. 6, no. 10, pp. 2099–2120. doi: 10.5194/bg-6-2099-2009.
111. Titlyanova A.A., Chuprova V.V. Changes in the carbon cycle as related to different land use practices (case studies in Krasnoyarsk region). *Eurasian Soil Sci.*, 2003, vol. 36, no. 2, pp. 201–208.
112. Ganzhara N.F., Borisov B.A. *Gumusoobrazovanie i agronomicheskaya otsenka organicheskogo veshchestva pochv* [Humus Formation and Agronomic Assessment of Soil Organic Matter]. Moscow, Agrokonsalt, 1997. 82 p. (In Russian)

113. 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. *J. Sci. Food Agric.*, 2014, vol. 94, no. 12, pp. 2362–2371. doi: 10.1002/jsfa.6577.
114. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Ermolaev A.M., Kuzyakov Ya.V. Changes in soil organic carbon pools during the self-restoration of arable soils. *Agrokhimiya*, 2009, no. 5, pp. 5–12. (In Russian)
115. Degtyarev V.V., Panasenko O.S., Nedbaev V.N. Content of humus colloidal particles in structural aggregates of chernozems typical for different forest-steppe conditions of Ukraine. *Vestn. Kursk. Gos. S-kh. Akad.*, 2013, no. 5, pp. 60–62. (In Russian)
116. Chuprova V.V. Mineralized pool of organic matter in agrochernozems of the southern part of Central Siberia. *Vestn. Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ.*, 2013, no. 9, pp. 83–89. (In Russian)
117. Sharkov I.N., Samokhvalova L.M., Mishina P.V., Shepelev A.G. Effect of crop residues on the organic matter composition of a leached chernozem in the Western Siberian forest-steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2014, vol. 47, no. 4, pp. 304–309. doi: 10.1134/S1064229314040085.
118. Kuznetsova T.V., Udaltsov S.N., Demkin V.A. Active organic matter mineralization in modern and buried chestnut soils of the dry steppe zone. *Vestn. Tambov. Univ. Ser. Estestv. Nauki*, 2013, vol. 18, no. 3, pp. 978–981. (In Russian)
119. Kogut B.M., Yashin M.A., Semenov V.M., Aydeeva T.N., Markina L.G., Lukin S.M., Tarasov S.I. Distribution of transformed organic matter in structural units of loamy sandy soddy-podzolic soil. *Eurasian Soil Sci.*, 2016, vol. 49, no. 1, pp. 45–55. doi: 10.1134/S1064229316010075.
120. Tsybul'ko N.N., Shapsheeva T.P., Arastovich T.V., Zaitsev A.A. Mineralization capacity of organic matter in peat soils and ¹³⁷Cs efflux into perennial grasses. *Melioratsiya*, 2010, no. 2, pp. 109–122. (In Russian)
121. Muller T., Hoper H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: Consequences for model application. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, vol. 36, no. 6, pp. 877–888. doi: 10.1016/j.soilbio.2003.12.015.
122. Schwendenmann L., Pendal E. Response of organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation. *Biol. Fertil. Soils*, 2008, vol. 44, no. 8, pp. 1053–1062. doi: 10.1007/s00374-008-0294-2.
123. Ivanov I.V., Pesochina L.S., Semenov V.M. Biological mineralization of organic matter in the modern virgin and plowed chernozems, buried chernozems, and fossil chernozems. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 10, pp. 1109–1119. doi: 10.1134/S1064229309100056.
124. Bond-Lamberty B., Thompson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, vol. 464, pp. 579–582. doi: 10.1038/nature08930.
125. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, vol. 38, no. 3, p. 425–448. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.08.020.
126. Luo Y., Zhou X. *Soil Respiration and the Environment*. Burlington, Acad. Press, 2006. 316 p.
127. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. *Global Change Biol.*, 2002, vol. 8, no. 8, pp. 800–812. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x.
128. Stepanov A.L. *Mikrobnaya transformatsiya parnikovykh gazov v pochvakh* [Microbial Transformation of Greenhouse Gases in Soils]. Moscow, GEOS, 2011. 192 p. (In Russian)
129. Bardgett R.D. Plant-soil interactions in a changing world. *Biol. Rep.*, 2011, vol. 3, art. 16, pp. 1–6. doi: 10.3410/B3-16.
130. Larionova A.A., Saprionov D.V., Lopez de Gerenyu V.O., Kuznetsova L.G., Kudryarov V.N. Contribution of plant root respiration to the CO₂ emission from soil. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 10, pp. 1127–1135. doi: 10.1134/S1064229306100103.
131. Zavarzin G.A., Kudryarov V.N. Soil as the main source of carbon dioxide and a pool of organic carbon in the territory of Russia. *Vestn. Ross. Akad. Nauk*, 2006, vol. 76, no. 1, pp. 14–29 (In Russian)
132. Saprionov D.V., Kuzyakov Ya.V. Separation of root and microbial respiration: Comparison of three methods. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 7, pp. 775–784. doi: 10.1134/S1064229307070101.
133. Kuzyakov Ya.V., Larionova A.A. Contribution of rhizomicrobial and root respiration to the CO₂ emission from soil (A review). *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 7, pp. 753–764. doi: 10.1134/S106422930607009X.

134. Kurganova I.N. Emission and balance of carbon dioxide in terrestrial ecosystems of Russia. *Extended Abstract of Doct. Biol. Sci. Diss.* Pushchino, 2010. 48 p. (In Russian)
135. Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Lopes de Gerenyu V.O., Schmitt M., Bahn M. Determination of root and microbial contributions to the CO₂ emission from soil by the substrate-induced respiration method. *Eurasian Soil Sci.*, 2010, vol. 43, no. 3, pp. 321–327. doi: 10.1134/S1064229310030105.
136. 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, vol. 48, no. 1, pp. 115–146. doi: 10.1023/A:1006244819642.
137. Larionova A.A., Yevdokimov I.V., Kurganova I.N., Sapronov D.V., Kuznetsova L.G., Lopes de Gerenyu V.O. Root respiration and its contribution to the CO₂ emission from soil. *Eurasian Soil Sci.*, 2003, vol. 36, no. 2, pp. 173–184.
138. 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. *Huan Jing Ke Xue*, 2004, vol. 25, no. 3, pp. 1–6. (In Chinese)
139. Swinnen J. Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil. *Plant Soil*, 1994, vol. 165, no. 1, pp. 89–101. doi: 10.1007/BF00009966.
140. Sapronov D.V. Long-term dynamics of CO₂ emission from gray forest and sod-podzolic soils. *Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. Diss.* Pushchino, 2008. 20 p. (In Russian)
141. Helal H.M., Sauerbeck D. Short term determination of the actual respiration rate of intact plant roots. In: McMichael B.L., Person H. (Eds.) *Plant Roots and Their Environment*. Amsterdam, Elsevier, 1991. pp. 88–92.
142. Yevdokimov I.V., Ruser R., Buegger F., Marx M., Munch J.C. Carbon turnover in the rhizosphere under continuous plant labeling with ¹³CO₂: Partitioning of root, microbial, and rhizomicrobial respiration. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 9, pp. 969–977. doi: 10.1134/S1064229307090074.
143. Da Costa J.M.N. Respiratory releases of carbon dioxide by aerial parts and roots of field-grown alfalfa and soybeans. *PhD Thesis*. Lincoln, Univ. of Nebraska, 1983. 125 p.
144. 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 Environ. Res.*, 2012, vol. 17, nos. 3–4, pp. 184–192.
145. Orlova O.V. Active organic matter as a regulator of nitrogen and carbon transformation processes in sod-podzolic soils. *Extended Abstract of Doct. Biol. Sci. Diss.* St. Petersburg, 2013. 48 p. (In Russian)
146. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Pochikalov A.V., Kaganov V.V., Gitarskii M.L. Microbial and root components of respiration of sod-podzolic soils in boreal forest. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2017, vol. 10, no. 7, pp. 717–727. doi: 10.1134/S199542551707006X.
147. 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. *Agric. For. Meteorol.*, 2011, vol. 151, no. 5, pp. 633–643. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.01.012.
148. Sadras V.O., Calderini D. *Crop Physiology: Application for Genetic Improvements and Agronomy*. Burlington, MA, USA, Acad. Press, 2009. 581 p.

⟨ **Для цитирования:** Суховеева О.Э. Проблемы моделирования биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 3. – С. 473–501. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.473-501. ⟩

⟨ **For citation:** Sukhoveeva O.E. Problems of modelling carbon biogeochemical cycle in agricultural landscapes. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 3, pp. 473–501. doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.473-501. (In Russian) ⟩