

УДК 631.4

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-122-129



СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ (ОБЗОР)

И. М. Рыжова^{1*}, В. А. Романенков¹, В. М. Степаненко²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

² Научно-исследовательский вычислительный центр, МГУ имени М.В. Ломоносова, 119234, Россия, Москва, ул. Колмогорова, д. 1, стр. 4

* E-mail: iryzhova@mail.ru

Почвы являются крупнейшим наземным резервуаром органического углерода, поэтому даже небольшое изменение запасов углерода в почвах может значительно повлиять на атмосферу и климат. Для выбора эффективных стратегий, направленных на смягчение последствий изменения климата, необходимы прогнозы реакции почв на будущие изменения климата и землепользования. Получение обоснованных прогнозов требует глубокого понимания очень сложной открытой многокомпонентной системы органического вещества почв. Одним из наиболее эффективных методов прогнозирования динамики органического вещества почв является математическое моделирование. Процесс-ориентированные, то есть физически обоснованные модели позволяют представить основные концепции о механизмах, определяющих поведение этой системы, в математически формализованном виде и провести количественный анализ. Неопределенность прогнозов зависит от уровня развития теории, объясняющей динамику органического вещества почв, представляющих ее моделей и их экспериментального обеспечения. В этом обзоре рассмотрены достижения последнего десятилетия в представлении в моделях роли микроорганизмов в стабилизации органического вещества почв, концепции насыщения почв органическим углеродом, температурного контроля, а также развитии моделей реактивного транспорта, описывающих динамику органического углерода в профиле почв, и представлении динамики органического вещества почв в глобальных климатических моделях. Обсуждаются нерешенные проблемы, связанные с высокой вариативностью структуры моделей динамики органического вещества почв нового поколения.

Ключевые слова: глобальный цикл углерода, биогеохимические модели, органический углерод почвы, изменение климата.

Введение

Почвы являются крупнейшим наземным резервуаром органического углерода. По последним данным запасы органического углерода в верхнем метровом слое почвы в среднем составляют 1700 Гт, что превышает его суммарные запасы в растительном покрове и атмосфере [Friedlingstein et al., 2023]. Поэтому даже небольшое изменение запасов углерода в почвах может значительно повлиять на содержание CO₂ в атмосфере и климат.

Для выбора эффективных методов управления, направленных на увеличение содержания органического вещества в почвах в целях смягчения последствий изменения климата и повышения плодородия, необходимы прогнозы реакции почв на будущие изменения климата и землепользования. Получение обоснованных прогнозов требует глубокого понимания очень сложной открытой много-

компонентной системы органического вещества почв. Одним из наиболее эффективных методов прогнозирования динамики органического вещества почв является математическое моделирование. Математические модели позволяют представить основные концепции о механизмах, определяющих поведение этой системы, в математически формализованном виде и провести количественный анализ.

Начиная с 1930-х годов опубликовано около 250 моделей [Manzoni, Porporato, 2009; Campbell, Paustian, 2015; Le Noe et al., 2023]. Характеристика биогеохимических моделей и история их развития представлены в обстоятельных обзорах конца XX в. [Jenkinson, 1990; Molina, Smith, 1998; Falloon, Smith, 2000]. Обсуждению современных проблем моделирования динамики органического вещества почв посвящены вышедшие в последнее время обзоры [Рыжова, 2011; Чертов, Комаров, 2013; Чертов,

Надпорожская, 2016; Manzoni, Porporato, 2009; Stockmann et al., 2013; Campbell, Paustian, 2015].

Особенности биогеохимических моделей во многом определяются пространственно-временным масштабом описываемых процессов, в соответствии с которым выделяют следующие классы моделей: М — описывают коротко временную динамику в малых объемах (микробиологические, ризосферные, модели почвенных агрегатов); L — описывают разложение растительных остатков; S — описывают динамику органического вещества почв; E — описывают динамику органического углерода в почве совместно с динамикой развития растений; G — глобальные модели. Наибольшая доля от общего количества моделей приходится на модели динамики органического вещества почв класса S [Manzoni, Porporato, 2009].

Проблема моделирования динамики органического вещества почв в первую очередь связана с его кинетической гетерогенностью. Скорости разложения его компонентов могут различаться на несколько порядков, что обусловлено как биохимическими особенностями органических соединений, так и их локализацией в почве, органоминеральными взаимодействиями, биологической активностью и условиями среды. Предложены два основных подхода для ее решения. Первый основан на концепции непрерывной потери качества субстрата, которое является мерой его доступности микробному воздействию [Agren, Bosatta, 1998]. Во втором подходе, получившем наибольшее распространение, органическое вещество почв представляют конечным числом пулов. В традиционных моделях пулы выбирают в соответствии со скоростями оборота. Пулы являются концептуальными, поэтому экспериментальные данные по фракционированию ОВП не могут быть полноценно использованы для калибровки и проверки моделей [Schmidt et al., 2011; Lehmann, Kleber, 2015]. Их количество является умозрительным. Структура традиционных моделей представляет собой цепь, звеньями которой являются пулы с возрастающим временем оборота. Для описания потоков углерода в системе используется кинетика первого порядка, предполагающая, что их скорости пропорциональны запасам органического вещества в выбранных пулах с учетом влияния внешних факторов (температура, влажность, текстура почвы и др.). В традиционных моделях предполагается, что разложение органического вещества происходит под действием микробов, но их активность учитывается неявно через константы скоростей разложения. Наибольшую известность среди них получили модели CENTURY, RothC, DNDC [Campbell, Paustian, 2015]. Они просты в математическом отношении и активно используются для решения широкого спектра экологических проблем. Однако традиционные модели неспособны описать динамику органического вещества почв за пределами линейных эффектов, не очень подходят для быстро изменяющихся условий среды и не дают

ответа на вопрос, почему лабильные органические вещества могут сохраняться в почве продолжительное время.

В настоящее время достижения в области химии и физики почв, успехи почвенной микробиологии, обусловленные развитием экспериментальных методов исследования, в значительной степени расширили представления о механизмах, определяющих устойчивость органического вещества почв. В соответствии с современными взглядами устойчивость органического вещества почв является результатом баланса между микробным разложением и защитой от него в результате агрегирования и органоминеральных взаимодействий. [Семенов, Когут, 2015; Schmidt et al., 2011; Blankinship et al., 2018]. Биогеохимические процессы, определяющие образование и устойчивость органического вещества почвы, играют ключевую роль в системе климат-углерод [Arora et al., 2013]. В связи с этим возникла потребность в моделях динамики органического вещества почв, явно описывающих эти процессы. Современные концепции нашли отражение в моделях новой генерации: MIMICS [Wieder et al., 2014], Millennial [Abramoff et al., 2018; 2022], MEMS [Robertson et al., 2019] и др. В них явно представлены субстрат-микробные взаимодействия, пулы не являются концептуальными, а выделены в соответствии с механизмами стабилизации органического вещества и имеют экспериментально определяемые аналоги. Для развития новых моделей принципиальное значение имеет представление совместного протекания и взаимодействия процессов трансформации свободного и защищенного органического вещества почв. Свободное органическое вещество представлено растительными остатками, образующими пул дисперсного органического вещества почвы POM (Particulate Organic Matter), и соединениями С в почвенном растворе, которые имеют низкую молекулярную массу, могут потребляться микробами, способны к миграции в почвенном профиле, а также к адсорбции на минеральных поверхностях, участвуя в образовании пула защищенного органического вещества MAOM (Mineral-Associated Organic Matter), устойчивость которого имеет физико-химическую природу [Robertson et al., 2019]. Экспериментальные оценки пулов POM и MAOM могут быть получены методами физического фракционирования по размеру и/или плотности [Lavallee et al., 2020].

Модели нового поколения характеризуются высоким структурным разнообразием в отличие от традиционных моделей со сходной структурой, так как они отражают различные наборы предположений, связанных с микробным контролем разложения и стабилизацией органического вещества в результате сорбции минеральными поверхностями и окклюзией в агрегатах. Сравнение традиционных моделей и моделей новой генерации показало, что использование новых моделей не сократило, а рас-

ширило разброс прогнозов между моделями из-за их высокой структурной вариативности. Расширение разброса не является ухудшением прогнозов, а позволяет получить более точную оценку их неопределенности [Sulman et al., 2018]. Высокая неопределенность прогнозов реакции почв на изменения климата и землепользования отражает пробелы в знаниях о биогеохимических почвенных процессах. Для уменьшения неопределенности прогнозов важны дальнейшие исследования, направленные на улучшение понимания динамики органического вещества почв путем синтеза результатов развития экспериментов, теории и моделей.

В качестве наиболее важных и перспективных областей дальнейшего развития моделей динамики органического вещества почв были предложены следующие: роль микробов в стабилизации органического вещества почв; кинетика насыщения почв органическим углеродом; температурный контроль динамики ОВ почв; динамика органического вещества в глубоких слоях почв; представление динамики органического углерода почв в глобальных климатических моделях [Campbell, Paustian, 2015].

Процесс-ориентированные динамические модели органического вещества почв очень активно развиваются начиная с 70-х годов XX в. [Manzoni, Porporato, 2009]. В настоящем обзоре мы обсуждаем достижения и оставшиеся нерешенные вопросы в каждом из названных выше направлений развития моделей за последнее десятилетие.

Роль микроорганизмов в стабилизации органического вещества почв

В опубликованном в последнее время обстоятельном обзоре, посвященном микробным моделям, представлена история их разработки, приводится сравнительная характеристика моделей и обсуждаются причины их высокого разнообразия, даны некоторые рекомендации по совершенствованию описания микробных процессов в моделях динамики органического вещества почв [Chandel et al., 2023].

Авторы проанализировали 71 модель. В число микробных моделей были включены все биогеохимические модели цикла углерода (или в сочетании с циклами других биофильных элементов), имеющие один или больше пулов микробной биомассы. В обзоре рассмотрены как традиционные линейные модели, в которых микробная активность учитывается неявно через константы скоростей разложения, так и модели, явно описывающие субстрат-микробные взаимодействия.

Хотя первые микробные модели появились в 70–80-х годах прошлого века [Parnas, 1975; McGill et al., 1981], особенно активно они начали развиваться только в последние два десятилетия. В период с 2015 по 2022 год было представлено 36 микробных моделей, что составляет половину от их общего ко-

личества. Микробные модели очень разнообразны. Они различаются как по выбору пулов и их количеству, так и использованию различных формулировок для описания микробных процессов. Например, в структуре модели Millennial [Abramoff et al., 2022] — один пул микробной биомассы, в модели MIMICS есть две группы микроорганизмов: одна активна в отношении метаболических компонентов растительного опада, а другая — в отношении структурного опада, обе также могут использовать органический углерод почвы [Wieder et al., 2014], в модели CORPSE также два пула микробной биомассы, но они разделены в пространстве: один действует в ризосфере, а другой — в основной массе почвы [Sulman et al., 2014]. В основе микробных моделей лежат различные гипотезы о процессах трансформации органического вещества почв. Традиционные модели исходят из предположения, что разложение органического вещества линейно зависит от количества субстрата, а микробный пул находится в равновесии с количеством субстрата и не ограничивает этот процесс, поэтому для его описания используют кинетику первого порядка по субстрату и нулевого порядка по микробной биомассе. Кинетика первого порядка по отношению к микробной биомассе применяется в микробных моделях, основанных на предположении, что разложение органического вещества почв ограничивается не количеством субстрата, а количеством экзоферментов, пропорциональным размеру микробного пула [Blagodatsky et al., 2010]. В моделях нового поколения, отражающих представления о зависимости разложения органического вещества почв как от количества субстрата, так и активности микробного сообщества, для описания субстрат-микробных взаимодействий используются нелинейные функции (прямая и обратная функции Михаэлиса – Ментен, приближение равновесной химии (ECA) и др.). Более 80% от общего количества микробных моделей являются нелинейными [Chandel et al., 2023]. Проведенный на основе базовых минимальных моделей сравнительный анализ показал, что различия в формулировках, используемых для описания процесса разложения, приводят к качественно различной динамике органического вещества почв [Wutzler, Reichstein, 2008]. Поэтому для развития моделей, позволяющих адекватно представить микробный контроль процессов трансформации органического вещества почв, важно проверить насколько они улучшают прогнозы запасов углерода и его потоков в пространственно-временном масштабе, для которого были созданы [Schimel, 2023]. В настоящее время убедительно показано, что краткосрочная динамика органического вещества почв в условиях быстрой смены условий окружающей среды (например, высушивание и повторное увлажнение) не может быть удовлетворительно описана линейными моделями, в которых не представлены микробные процессы

[Lawrence et al., 2009]. Большинство моделей новой генерации включают субстрат-микробные взаимодействия для представления долгосрочной динамики органического углерода почв в масштабе от экосистемы до глобального уровня [Schimel, 2023]. При этом возникают серьезные трудности, обусловленные проблемой масштаба. Например, как перейти от локальной модели для микроучастка, в которой микробиологические процессы разделены по их локализации в ризосфере и общем объеме почвы, к моделям экосистемного, регионального или глобального уровней. Для того чтобы понять, какие из множества механизмов, действующих в мелком масштабе, нужно включить в модели более крупного пространственно-временного масштаба, можно использовать минимальные базовые модели, позволяющие проследить, как зависит динамика органического вещества почв от конкретных процессов и используемых формализмов.

Рассмотрение микробиологической составляющей процессов трансформации органического вещества почв обусловило новый интерес к параллельному изучению динамики N, контролирующей процессы трансформации органического C, в том числе распределение пулов POM и MAOM [Cotrufo et al., 2019]. Переход к моделям, описывающим взаимосвязь динамики C и N, позволяет непосредственно описать такие процессы, как азотное лимитирование разложения опада и эффективность использования C микробиотой почвы [Zhang et al., 2021]. В этом случае вновь возникает вопрос о непосредственном описании обратных связей в системе растение-микроорганизмы, конкурирующих между собой в условиях азотного лимитирования. Для микроорганизмов типичной ответной реакцией является изменение состава продуцируемых ферментов, чтобы использовать органическое вещество почв в качестве источника азота, а для растений — усиление экссудатной активности корневой системы. Учитывая сложность взаимодействия циклов C и N, описание в моделях совместной динамики углерода и азота в почве может, с одной стороны, увеличить неопределенность прогнозов, а с другой — повысить их обоснованность.

Кинетика насыщения почв органическим углеродом

Вторым из рассматриваемых направлений развития моделей динамики органического вещества почв является отражение в них концепции насыщения почвы органическим углеродом. Она допускает существование предела накопления почвами C в связанных с минералами фракциях [Six et al., 2002; Stewart et al., 2007]. По мнению ряда исследователей, насыщение почвы углеродом может быть связано также с экологическими ограничениями роста микробной биомассы [Craig et al., 2021]. В соответствии с традиционными моделями будет наблюдаться ли-

нейный рост стационарных запасов органического углерода в почве при увеличении его поступления с растительными остатками и органическими удобрениями. По мнению [Campbell, Paustian, 2015], данное обстоятельство может приводить к значительному завышению оценок перспектив смены землепользования или элементов агротехнологий в секвестрации C почвами. Гипотеза о насыщении почв органическим углеродом базируется на положении о том, что конечная площадь наиболее реакционноспособных тонких фракций почвы определяет протекание таких биохимических и физических механизмов стабилизации, как катионные мостики, поверхностное комплексообразование и агрегацию. Обсуждаемая концепция в полной мере применима к объяснению динамики пула защищенного органического углерода MAOM, но не к пулу свободного органического углерода POM. Последний теоретически не имеет предела насыщения [Robertson et al., 2019]. Отметим, что в соответствии с концепцией насыщения пахотные почвы (или в более широком смысле — почвы управляемых территорий), потерявшие значительные количества органического вещества в результате хозяйственного использования, например распахки, являются перспективными объектами для дополнительного накопления C.

При моделировании насыщения почвы органическим углеродом в рамках традиционных моделей возникают трудности, связанные с тем, что пулы являются концептуальными, выбраны по скоростям оборота и не имеют измеряемых аналогов. Эта проблема исчезает при переходе к моделям, где пулы определены в соответствии с механизмами стабилизации органического вещества и измеряемы. Концепция насыщения представлена в моделях нового поколения [Ahrens et al., 2015; Abramoff et al., 2018; Robertson et al., 2019; Zhang et al., 2021].

В литературе можно найти оценки уровня насыщения почв, полученные путем анализа большого массива данных, характеризующих пул защищенного органического углерода в почве MAOM по результатам физического фракционирования органического вещества почв по размеру и/или плотности, минералогию и гранулометрический состав естественных и сельскохозяйственных почв разных биоклиматических регионов. Установлено, что уровень насыщения почв органическим углеродом определяется их минералогией и гранулометрическим составом, а степень насыщения зависит от климата, растительного покрова и характера землепользования [Когут, Семенов, 2020; Georgiou et al., 2022]. Эти количественные оценки могут быть использованы для параметризации моделей, описывающих насыщение почвы органическим углеродом.

Нами проведен сравнительный анализ динамики органического углерода почв на основе двух базовых, неотягощенных деталями моделей — традиционной линейной и нелинейной модели SOCS

(Soil Organic Carbon Saturation), отражающей насыщение почвы органическим углеродом. Модель основана на предположении, что по мере заполнения углерод-протекторной емкости почвы уменьшается ее способность к защите органического вещества от микробного разложения. Она не описывает в явном виде каждый из механизмов стабилизации органического вещества в почве, а оценивает их интегральное влияние на поведение системы. Рассматривались двухкомпонентные модели. В традиционной линейной модели органический углерод почвы представлен двумя пулами, различающимися по скоростям оборота. Модель SOCS описывает динамику свободного (незащищенного) и защищенного органического вещества. Проведенный анализ показал, что в отличие от традиционной модели, демонстрирующей линейный рост стационарных запасов быстрого и медленного пулов с увеличением поступления органического углерода в почву, в соответствии с моделью SOCS линейно увеличивается только стационарный запас свободного органического вещества, тогда как стационарный запас защищенного органического углерода асимптотически приближается к уровню насыщения. Результаты расчетов, выполненных для целинных черноземов, показали, что они характеризуются очень низкой долей незащищенного органического вещества по отношению к его общим запасам в верхнем слое почвы, что согласуется с литературными данными, полученными экспериментально. При моделировании отклика пахотных черноземов на применение высоких доз органических удобрений линейная модель его завышает по сравнению с моделью SOCS.

Температурный контроль динамики ОБ почв

В традиционных моделях для описания температурной зависимости использовались различные эмпирические функции. Их сравнение приведено в статье (Tuomi et al., 2008). Неопределенность прогнозов отклика динамики органического вещества почв на изменения температуры связана с дискуссионностью вопроса о температурной чувствительности органического вещества почв. В результате многочисленных исследований были получены противоречивые данные о температурной чувствительности, на основе которых было сформулировано несколько взаимоисключающих гипотез. Возможные причины противоречивости результатов, в первую очередь, объясняются сложностью проблемы. В соответствии с кинетической теорией температурная чувствительность увеличивается с ростом устойчивости субстрата. Но в почве «наблюдаемая» температурная чувствительность может отличаться от теоретической из-за воздействия комплекса факторов окружающей среды [Davidsons, Janssens, 2006]. В связи с этим трудно определить, какая из гипотез реализуется в

почве в зависимости от сочетания разных условий. Выбор гипотезы при описании температурной чувствительности разложения органического вещества почв имеет большое значение при моделировании углеродного цикла, так как от этого зависит степень проявления обратной связи между климатическими изменениями и почвой [Рыжова, 2013].

Для развития моделей нового поколения, явно описывающих динамику микробной биомассы, большое значение имеют исследования температурной чувствительности показателя эффективности использования углерода (CUE). Этот параметр является критическим параметром для этих моделей, так как он характеризует распределение углерода между потерями на дыхание и синтезом в микробную биомассу, от размера которой зависит скорость трансформации органического вещества. Большинство исследований показывают, что этот показатель снижается с повышением температуры, что ограничивает разложение и потерю органических веществ [Schimel, 2023].

Динамика органического вещества в глубоких слоях почв

Большинство моделей описывает динамику органического вещества в верхнем слое почв мощностью 20 или 30 см, что объясняется его более быстрым оборотом и большей чувствительностью к хозяйственным воздействиям по сравнению с органическим веществом более глубоких слоев почв. Однако в почвоведении всегда уделялось большое внимание изучению распределения органического вещества в профиле почв, и первые модели, описывающие вертикальное распределение органического углерода в почве, появились еще в конце 1970-х годов, но активно развиваться они начали только в XXI в. Моделирование динамики органического углерода в глубоких слоях почвы основано на представлениях о вертикальной миграции водорастворимого органического вещества, биотурбациях, вертикальном распределении поступления корневого опада. Для улучшения этих моделей может быть важен учет прайминг-эффекта. Модели динамики органического углерода в глубоких слоях различаются по уровню сложности. Их характеристика приведена в обзоре [Campbell, Paustian, 2015]. О развитии этого направления исследований в последнее десятилетие можно судить по моделям COMMISSION [Ahrens et al., 2015], OC-VGEN [Keyvanshokouhi et al., 2019] и MEMS 2.0 model [Zhang et al., 2021]. Модель COMMISSION описывает динамику содержания органического углерода с учетом его распределения в почвенном профиле на основе представлений о микробных взаимодействиях, сорбции минералами и вертикальном переносе. Профиль разделен на несколько слоев, в текущей реализации 100, и разные слои получают органический углерод либо в виде поступления наземного опада сверху, вертикаль-

но распределенного поступления корневого опада, либо переноса из других слоев с потоком воды или биотурбаций. Модель OC-VGEN имеет модульную структуру и описывает динамику профильного распределения содержания органического углерода, тепла, воды и газов, а также биотурбации. Она была проверена по результатам долгосрочных экспериментов на Luvisols, которые включали разные виды землепользования (выращивание сельскохозяйственных культур, пастбища) и методы обработки почв. На основе OC-VGEN были получены прогнозы поведения почв при разных климатических сценариях и системах землепользования до 2100 г. Первая версия модели MEMS v1.0 [Robertson et al., 2019] учитывает разнокачественность поступающих в почву органических веществ, эффективность использования С микроорганизмами и влияние минеральной матрицы почвы на трансформацию и стабилизацию органического вещества. В модели отражена концепция насыщения почвы органическим углеродом. Эта версия модели описывает динамику углерода только в верхнем слое почвы. Вторая версия этой модели MEMS 2.0 позволяет описывать динамику С в нескольких слоях почвы до определенной пользователем глубины, в нее добавлены азотная модель, модель вертикального транспорта влаги, минерального азота и растворенного органического вещества в профиле почв.

Представление динамики органического углерода почв в глобальных моделях

Для снижения неопределенности прогнозов глобального изменения климата очень важна реакция почв на изменение температуры, количества осадков и концентрации CO_2 в атмосфере, так как запасы почвенного углерода чувствительны к этим показателям. Поэтому для надежной оценки баланса углерода важно с достаточной точностью моделировать современный уровень накопления углерода в почве. Глобальные модели имитируют взаимодействия климата и биогеохимических циклов. В рамках проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP) CMIP5 было показано, что модельные оценки глобальных запасов углерода в почве варьировали от 510 до 3040 Пг С по сравнению с оценкой Гармонизированной мировой базы данных по почвам (HWSD) в 1 260 Пг С (с 95% доверительным интервалом 890–1 660 Пг С). Пространственное распределение запасов углерода в почве плохо коррелировало с HWSD (коэффициенты корреляции Пирсона менее 0,4 и среднеквадратические ошибки от 9,4 до 20,8 кг С м^2) [Todd-Brown et al., 2013]. Результаты последнего поколения моделей CMIP6 лучше по сравнению с CMIP5, но сохраняется несогласованность в пространственном распределении запасов углерода, в частности недооценка запасов в почвах северных широт [Varney et al., 2022]. Предполагается, что улучшение моделирования процес-

сов превращения органического углерода в почве снизит неопределенность прогнозов. В последнее десятилетие были определены основные направления исследований для получения более реалистичных прогнозов динамики запасов углерода на основе глобальных моделей [Luo et al., 2016; Dwivedi et al., 2019]. Они включают сбор информации, необходимой для улучшения экспериментального обеспечения и проверки моделей, и поиск оптимальной структуры. В настоящее время в большинство глобальных моделей для описания динамики органического углерода почв встроены традиционные линейные модели. Использованию моделей нового поколения препятствует высокая вариативность их структуры. Поэтому актуальной задачей является поиск подходящей для глобального моделирования модели, отражающей современное понимание роли микроорганизмов, минеральных ассоциаций и агрегирования в динамике органического вещества почв. Для этого очень полезным может быть созданный в рамках численной модели деятельного слоя суши (ДСС) ИВМ РАН-МГУ универсальный конструктор моделей углеродного цикла (УЦ) в почве и растительности для возможности реализации широкого спектра существующих и перспективных моделей.

Информация о финансировании работы

Работа осуществлена при поддержке АИС-НОШ № 23-Ш07-55.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102.
2. Рыжова И.М. Проблемы и перспективы моделирования динамики органического вещества почв // Агрохимия. 2011. № 12.
3. Рыжова И.М. Проблемы описания температурной чувствительности разложения органического вещества почв в моделях круговорота углерода // Математическое моделирование в экологии: материалы третьей национальной научной конференции с международным участием (Пушино, 21–25 окт. 2013 г.). Пушино, 2013.
4. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М., 2015.
5. Чертов О.Г., Комаров А.С. Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. 2013. № 8.
6. Чертов О.Г., Надпорожская М.А. Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспек-

тивы // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 2.

7. Abramoff R., Xu X., Hartman M. et al. The Millennial model: in search of measurable pools and transformations for modeling soil carbon in the new century // *Biogeochemistry*. 2018. Vol. 137.

8. Abramoff R.Z., Guenet B., Zhang H., et al. Improved global-scale predictions of soil carbon stocks with Millennial Version 2. // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 164.

9. Ågren G.I., Bosatta E. Theoretical ecosystem ecology. Understanding element cycles. Cambridge, 1998.

10. Ahrens B., Braakhekke M.C., Guggenberger G. et al. Contribution of sorption, DOC transport and microbial interactions to the ^{14}C age of a soil organic carbon profile: insights from a calibrated process model // *Soil Biol. Biochem.* 2015. Vol. 88.

11. Arora V.K., Boer G.J., Friedlingstein P. et al. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth system models // *J. Climate*. 2013. Vol. 26.

12. Blagodatsky S., Blagodatskaya E., Yuyukina T. et al. Model of apparent and real priming effects: Linking microbial activity with soil organic matter decomposition // *Soil Biol. Biochem.* 2010. Vol. 42, № 8.

13. Blankinship J.C., Berhe A.A., Crow S.E. et al. Improving understanding of soil organic matter dynamics by triangulating theories, measurements, and models // *Biogeochemistry*. 2018. Vol. 140.

14. Campbell E.E., Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review // *Environ. Res. Lett.* 2015. Vol. 10. 123004.

15. Chandel A.K., Jiang L., Luo Y. Microbial Models for Simulating Soil Carbon Dynamics: A Review // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2023. Vol. 128, № 8.

16. Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nat. Geosci.* 2019. Vol. 12.

17. Craig E.M., Mayes M.A., Sulman B.N. et al. Biological mechanisms may contribute to soil carbon saturation patterns // *Glob Change Biol.* 2021. Vol. 27.

18. Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10 // *Glob. Change Biol.* 2006. Vol. 12.

19. Dwivedi D., Tang J., Bouskill N. et al. Abiotic and Biotic Controls on Soil Organo-Mineral Interactions: Developing Model Structures to Analyze Why Soil Organic Matter Persists // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2019. Vol. 85.

20. Falloon P.D., Smith P. Modelling refractory soil organic matter // *Biol. Fertil. Soils*. 2000. Vol. 30.

21. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2023 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2023. Vol. 15.

22. Georgiou K., Jackson R.B., Vinduškova O. et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, 3797.

23. Jenkinson D.S. The turnover of organic-carbon and nitrogen in soil // *Philosophical Transactions of the Royal Society. B*. 1990. Vol. 329.

24. Keyvanshokouhi S., Sophie S., Cornu F. et al. Effects of soil process formalisms and forcing factors on simulated organic carbon depth-distributions in soils // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 652.

25. Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated

forms to address global change in the 21st century // *Glob. Change Biol.* 2020. Vol. 26.

26. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528.

27. Luo Y., Ahlström A., Allison S. et al. Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models // *Global Biogeochem. Cycles*. 2016. Vol. 30.

28. Manzoni S., Porporato A. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales // *Soil Biol. Biochem.* 2019. Vol. 41.

29. McGill W.B., Hunt H.W., Woodmansee R.G. et al. PHOENIX, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils // *Ecological Bulletins*. 1981. Vol. 33.

30. Molina J.A.E., Smith P. Modelling carbon and nitrogen processes in soils // *Adv. Agron.* 1998. Vol. 62.

31. Parnas H. Model for decomposition of organic material by microorganisms // *Soil Biol. Biochem.* 1975. Vol. 7, № 2.

32. Robertson A.D., Paustian K., Ogle S. et al. Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model // *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16.

33. Schimel J. Modeling ecosystem-scale carbon dynamics in soil: The microbial dimension // *Soil Biol. Biochem.* 2023. Vol. 178. 108948.

34. Schmidt M., Torn M., Abiven S. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. 7367.

35. Six J., Conant R., Paul E.A. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil*. 2002. Vol. 241.

36. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T. et al. Soil C saturation: concept, evidence, and evaluation // *Biogeochemistry*. 2007. Vol. 86.

37. Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W. et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2013. Vol. 164.

38. Sulman B.N., Phillips R.P., Oishi A.C. et al. Microbe-driven turnover offsets mineral-mediated storage of soil carbon under elevated CO_2 // *Nat. Clim. Change*. 2014. Vol. 4.

39. Sulman B.N., Moore J.A.M., Abramoff R. et al. Multiple models and experiments underscore large uncertainty in soil carbon dynamics // *Biogeochemistry*. 2018. Vol. 141.

40. Todd-Brown K.E.O., Randerson J.T., Post W.M. et al. Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10, № 3.

41. Tuomi M., Vanhala P., Karhu K. et al. Heterotrophic soil respiration – comparison of different models describing its temperature dependence // *Ecological Modelling*. 2008. Vol. 211.

42. Varney R.M., Chadburn S.E., Burke E.J. et al. Evaluation of soil carbon simulation in CMIP6 Earth system models // *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19.

43. Wieder W.R., Grandy A.S., Kallenbach C.M. et al. Integrating microbial physiology and physio-chemical principles in soils with the Microbial-Mineral Carbon Stabilization (MIMICS) model // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11.

44. Zhang Y., Lavallee J.M., Robertson A.D. et al. Simulating measurable ecosystem carbon and nitrogen dynamics with the mechanistically defined MEMS 2.0 model // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18.

Поступила в редакцию 17.06.2024
После доработки 10.07.2024
Принята к публикации 30.07.2024

MODERN DEVELOPMENT OF SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS MODELS (REVIEW)

I. M. Ryzhova, V. A. Romanenkov, V. M. Stepanenko

Soils are the largest terrestrial reservoir of organic carbon, so even small changes in soil carbon stocks can have significant effects on the atmosphere and climate. To select effective strategies to mitigate climate change, predictions of how soils will respond to future changes in climate and land use are needed. Achieving meaningful predictions requires a deep understanding of the highly complex, open, multicomponent soil organic matter system. One of the most effective methods for predicting the dynamics of soil organic matter is mathematical modeling. Process-oriented (physically based) models make it possible to present the basic concepts about the mechanisms that determine the behavior of this system in a mathematically formalized form and conduct a quantitative analysis. The uncertainty of the forecasts depends on the level of development of the theory explaining the dynamics of soil organic matter, the models representing it and their experimental support. This review examines the achievements of the last decade in modeling the role of microorganisms in the stabilization of soil organic matter, the concept of soil saturation with organic carbon, temperature control, as well as the development of reactive transport models describing the dynamics of organic carbon in the soil profile, and the representation of the dynamics of soil organic matter in global climate models. Unsolved problems associated with the high variability in the structure of new generation soil organic matter dynamics models are discussed.

Keywords: Global carbon cycle, biogeochemical models, soil organic carbon, climate change.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжова Ирина Михайловна, докт. биол. наук, профессор кафедры общего почвоведения факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: iryzhova@mail.ru

Романенков Владимир Аркадьевич, докт. биол. наук, заведующий кафедрой агрохимии и биохимии растений факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: romanenkov@soil.msu.ru

Степаненко Виктор Михайлович, докт. физ.-мат. наук, заместитель директора научно-исследовательского вычислительного центра МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: v.stepanenko@rcc.msu.ru