

УДК: 004.9:631.4

Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы

О. Г. Чертов^{1,a}, М. А. Надпорожская²

¹ Бингенский политехнический университет,
ФРГ, 55411, г. Бинген, ул. Берлинштрассе, д. 109

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Ораниенбаумское шоссе, д. 2

E-mail: ^a ochertov@rambler.ru

*Получено 15 февраля 2016 г.
после доработки 22 марта 2016 г.*

Почва как сложная полифункциональная открытая система является одним из наиболее проблемных объектов для моделирования. Несмотря на значительные успехи в моделировании почвенной системы, существующие модели не отражают все факторы и процессы минерализации и гумификации органического вещества в почве. С учетом опыта создания и широкого применения системы моделей ROMUL и EFIMOD определены проблемы и точки роста в области моделирования динамики органического вещества почв и элементов-биофилов. В работе рассмотрены вопросы дальнейшего теоретического обоснования, улучшения структуры моделей, подготовки и неопределенности исходных данных, включения всей почвенной биоты (микроорганизмов, микро- и мезофауны) как факторов гумусообразования, влияния минералогического состава почв на динамику углерода и азота, гидротермического режима и формирования органического вещества по профилю почвы, вертикальной и горизонтальной миграции органического вещества. Для успешного решения этих задач необходима эффективная обратная связь между разработчиками моделей и экспериментаторами.

Ключевые слова: математическая модель, органическое вещество почв

Models of soil organic matter dynamics: problems and perspectives

O. G. Chertov¹, M. A. Nadporozhskaya²

¹ University of Applied Sciences Bingen, 109 Berlinstrasse, Bingen, 55411, Germany

² St. Petersburg State University, 2 Oranienbaum Road, St. Petersburg, 198504, Russia

Abstract. — Soil as a complex multifunctional open system is one of the most difficult object for modeling. In spite of serious achievements in the soil system modeling, existed models do not reflect all aspects and processes of soil organic matter mineralization and humification. The problems and “hot spots” in the modeling of the dynamics of soil organic matter and biophylous elements were identified on a base of creation and wide implementation of ROMUL and EFIMOD models. The following aspects are discussed: further theoretical background; improving the structure of models; preparation and uncertainty of the initial data; inclusion of all soil biota (microorganisms, micro- and meso-fauna) as factors of humification; impact of soil mineralogy on C and N dynamics; hydro-thermal regime and organic matter distribution in whole soil profile; vertical and horizontal migration of soil organic matter. An effective feedback from modellers to experimentalists is necessary to solve the listed problems.

Keywords: mathematic model, soil organic matter

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 391–399 (Russian).

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проект № 15-04-08707.

Введение

Почва, как компонент наземной экосистемы, выполняет уникальные функции в биологическом круговороте элементов благодаря минерализации в ней органического вещества (ОВ) отмерших организмов и их прижизненных выделений. Более того, депонирование части этого ОВ в почве в форме медленно минерализуемого гумифицированного материала является основным фактором стабилизации функционирования экосистем в меняющейся природной среде, обеспечивающим также быстрое восстановление растительности и в целом биоты после природных и антропогенных нарушений. Поэтому изучение динамики ОВ почв является приоритетным направлением в динамическом моделировании почвенной системы. Модель динамики ОВ почвы, как базовая компонента, логически встраивается в модели экосистем. Следует подчеркнуть, что значительная часть существующих экосистемных моделей не принимает во внимание почвенные процессы, которые определяют продуктивность фотосинтезирующих организмов благодаря обратной связи в виде поступающих из почвы элементов питания и оптимизации физической среды [Комаров и др., 2007].

Почва, как сложная полифункциональная дисперсная четырехфазная открытая система, является одним из наиболее сложных объектов для моделирования. Трудности создания почвенных моделей не только в проблеме выбора соответствующего теоретического обоснования, вычисления количественных оценок для структурных блоков и коэффициентов их трансформации и т. д. Имитационные математические модели требуют согласованного участия специалистов нескольких научных направлений: почвоведов, химиков, зоологов, экологов, климатологов, математиков и программистов. К креативному ядру модельной команды примыкают экспериментаторы, поставляющие базы данных для вычисления основных коэффициентов и входных параметров, калибровки и верификации программного продукта. Важно не только заложить методологические основы создания почвенных моделей, но и длительно поддерживать и развивать их. Создание коллектива единомышленников с таким разнообразным научным кругозором является отдельной задачей. В качестве примера многолетней продуктивной работы по развитию модели почвы, а на ее основе — наземной экосистемы можно представить сотрудничество специалистов по моделям ROMUL и EFIMOD.

Настоящее сообщение написано в память о замечательном человеке и ведущем ученом Александре Сергеевиче Комарове, пожалуй, единственном профессиональном математике России на рубеже XX и XXI веков, который посвятил свою исследовательскую деятельность решению биологических, ботанических, экологических и почвенных проблем. Поскольку он всю жизнь проработал в Институте почвоведения и агрохимии (в настоящее время Ин-т физических, химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук), его работа была связана с почвоведением, а именно с созданием и применением модели динамики органического вещества почв ROMUL и модели лесной экосистемы EFIMOD.

В чем же специфика разработки моделей динамики ОВ почв? Хотя первая попытка математического описания процесса трансформации ОВ почв была предпринята еще в XIX веке [Костычев, 1889], моделирование динамики органического вещества (ОВ) почв реально началось только во второй половине XX века. К настоящему времени разработано значительное количество динамических имитационных моделей (simulation models) для почв агро- и природных (лесных и степных) экосистем, значительно различающихся по своему теоретическому обоснованию (см. обзоры по почвам природных экосистем [Комаров и др., 2007] и агроземам [Manzoni, Porporato, 2009]). В моделях ОВ почв агроэкосистем в основном воспроизводится динамика ОВ пахотного горизонта. В моделях ОВ почв разного генезиса природных экосистем присутствует органический и гумусово-аккумулятивный горизонт либо фиксированная часть почвенного профиля. В большинстве моделей ОВ почв единственным агентом трансформации ОВ выступают микроорганизмы. Лишь две модели принимают во внимание гумусообразующую роль почвенной фауны в очень обобщенной форме [Chertov, Komarov, 1997; Chertov et al., 2001; Kätterer, Andrén, 2001]. В существующих моделях почвенной микро- и мезофауны [Holtkamp et al., 2011] и дождевых червей [Huang et al., 2010] не уделяется должного внимания процессам формирования гумусовых веществ.

Тестирование разработанных моделей показало, что в целом они соответствуют уровню научного понимания функционирования почвенной системы и адекватны в ее имитации. В моделях, оценивающих динамику ОВ почв в разных масштабах, локальном, региональном, глобальном, решаются похожие задачи. Но на региональных и глобальных уровнях вычислительных экспериментов снижается степень детализации входных параметров, понижается точность прогнозных оценок, уменьшается возможность проверки получаемых результатов. Несмотря на значительный прогресс в моделировании динамики почв, остается значительное количество задач, требующих своего решения при усовершенствовании существующих и создании новых моделей.

Опираясь на опыт создания и применения модели ROMUL [Chertov, Komarov, 1997; Chertov et al., 2001], в которой динамика ОВ почвы (фактически углерода) воспроизводится хорошо, а поведение азота — только удовлетворительно, мы можем сформулировать следующие проблемы и точки роста при моделировании динамики органического вещества почв и элементов-биофилов: дальнейшее теоретическое обоснование, улучшение структуры моделей, подготовка и ранжирование исходных данных. Требуют отдельного внимания также и некоторые теоретико-практические вопросы имитационного моделирования, возникающие по мере развития науки. Эти перспективные вопросы и проблемы, которые неоднократно были обсуждены с Александром Сергеевичем, частично опубликованные, а частично оставшиеся в устных дискуссиях, рассмотрены в данном сообщении и представлены на рис. 1.

Совершенствование теоретического обоснования моделей

Эта принципиальная задача частично уже обсуждена в опубликованных материалах [Комаров и др., 2007; Чертов, Комаров, 2013] с критикой достаточно упрощенных представлений об ОВ почв, используемых в моделировании. ОВ почв — сложная динамичная система, состоящая из каскада подсистем (пулов), взаимодействующих и изменяющихся с различными скоростями. В подавляющем большинстве моделей ОВ почвы представлено пулами *стабильного* (устойчивого, пассивного) медленно минерализуемого ОВ, *лабильного* (дисперсного) достаточно быстро минерализуемого ОВ и в ряде моделей — *активного* ОВ микробной биомассы, а в последнее время к этим пулам добавлено *инертное* ОВ древесного угля (black carbon) [Kögel-Knabner, Matzner, 2008].

Возникает проблема при переходе от теоретического обоснования пулов к их практическому выделению: еще нет комплекса методов, с помощью которых можно было бы определить содержание этих пулов в почве. Данные, полученные по разным методикам, могут частично перекрываться. Теория *закрепления продуктов метаболизма биоты* отрицает процесс гумификации, а за основу выделения пулов принимает результаты физического фракционирования ОВ по удельному весу и окисляемости [Kögel-Knabner, Matzner, 2008; Чертов, 2016]. При этом концептуально упускается оценка специфики трансформации ОВ в органических горизонтах почв, в которых формируется устойчивое к минерализации *гумифицированное ОВ*, образование которого не может быть объяснено данной теорией.

В классической теории гумификации рассматривается ряд этапов гумусообразования с соответствующими сообществами организмов-деструкторов, как минерализующих ОВ, так и трансформирующих продукты жизнедеятельности биоты в гумусовые вещества.

Оба эти подхода недостаточны: в теории закрепления продуктов биоты не разработана оценка формирования устойчивого ОВ из других фракций; в теории гумификации недостаточно обоснованы количественные параметры гумификации, особенно под влиянием почвенной фауны. Изучение процессов гумификации с закреплением ОВ в почве находится в основном на стадии определения структурных закономерностей и механизмов формирования гумусовых веществ, без акцента на количественные характеристики этих процессов, что необходимо для создания моделей.

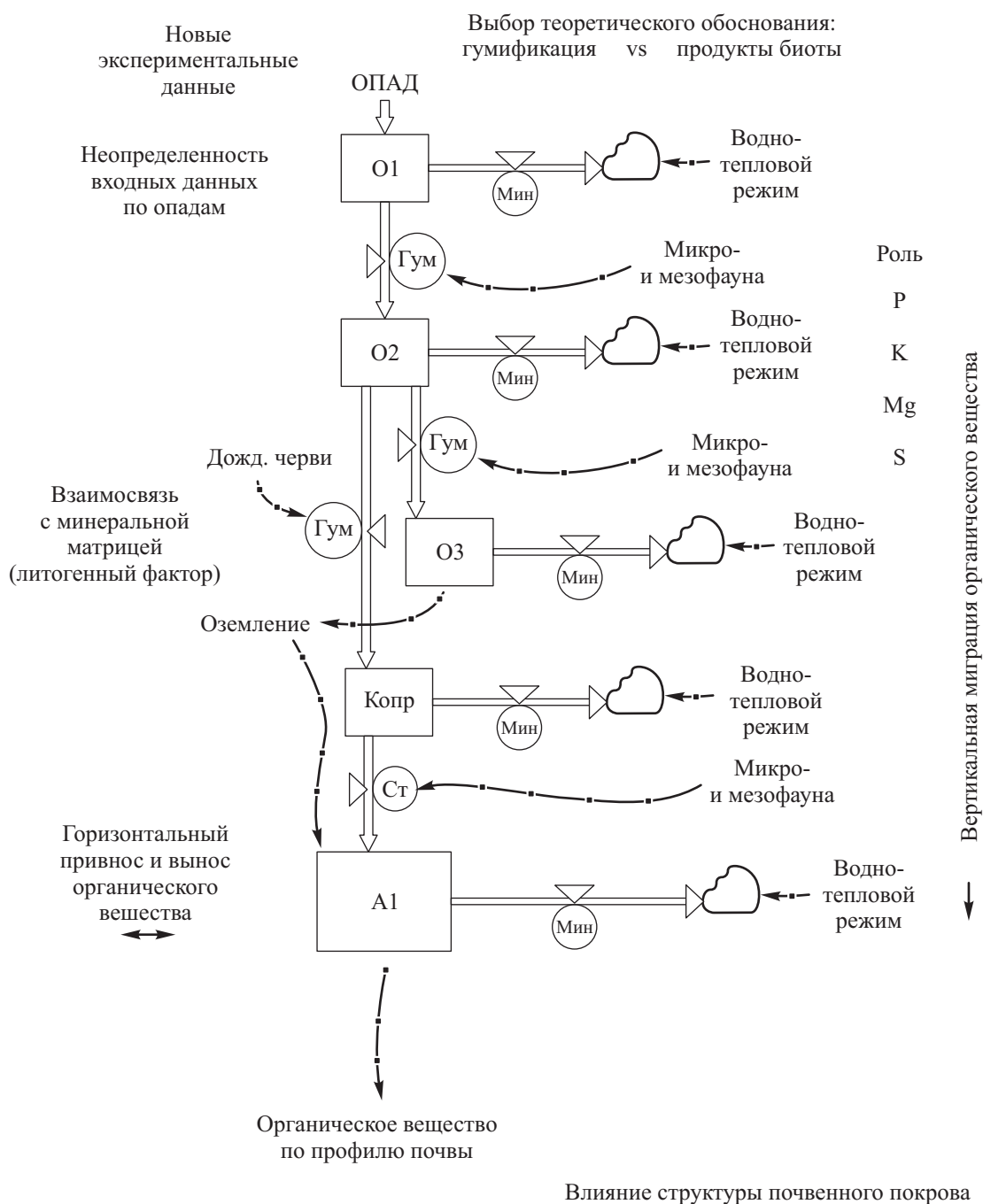


Рис. 1. Процессы, параметры и объекты при моделировании динамики органического вещества почв, требующие дополнительной проработки или включения в модели, на примере упрощенной схемы Romul_Hum [Комаров и др., 2015] для одной когорты наземного опада. Символы в геометрических фигурах — компоненты модели; надписи — рассматриваемые задачи. O1...O3 и A1 — пулы органического вещества в горизонтах лесной почвы; Копр — органическое вещество свежих копролитов; Мин — минерализация; Гум — гумификация; Ст — стабилизация органического вещества копролитов; штрихпунктирные стрелки — адресные указатели задач; надписи без стрелок относятся ко всей модели

Изучение влияния литогенного фактора на формирование ОВ почв успешно развивается в химии почв, но количественные оценки еще не перенесены в математические модели. Частично этот вопрос был решен на качественном уровне в классификации форм гумуса почв [Чертов, 1981], когда почвы тяжелого гранулометрического состава были разделены на основе

карбонатности почвообразующих пород. Более детальное разделение на фракции гумифицированного или связанного с полуторными окислами или почвенными минералами ОВ не используется. Предложенная гипотеза о влиянии полуторных оксидов на качество ОВ лесных почв на песках [Шаяхметова и др., 2015] нуждается в разработке и параметризации. Остается неразработанной также и количественная оценка влияния гранулометрического состава на формирование системы ОВ почв и ее отражение в моделях.

Отдельной задачей является параметризация действия зоологического фактора. Роль почвенной фауны в гумусообразовании была известна еще в XIX веке и получила отражение в постоянно развивающейся концепции «форм гумуса» [Чертов, 1981; Zanella et al., 2011], однако она не принимается во внимание в большинстве из существующих моделей динамики ОВ почв [Чертов, Комаров, 2013; Чертов, 2016]. В настоящее время роль всей почвенной биоты в моделях динамики ОВ почв сводится только к минерализации ОВ, а ее участие в формировании ОВ гумифицированного материала не принимается во внимание. Только в последнее время появился подход к количественной оценке вклада почвенной фауны в формирование гумусовых веществ [Чертов, 2016] на основе анализа функционирования пищевых сетей почвенной фауны. Этот подход также дает возможность вычислять количество минерализуемого азота [Holtkamp et al., 2011]. Обобщение значительного количества исследований почвенных зоологов позволило подойти к созданию динамической модели ОВ почвы Romul_Hum с функциональными блоками почвенной фауны на базе упомянутой выше модели ROMUL [Комаров и др., 2015].

Большинство существующих моделей ОВ почвы вычисляют динамику общего ОВ или углерода, значительная часть — также и азота. Ранее только одна из первых версий модели Century рассматривала динамику четырех элементов — С, N, P и S [Parton et al., 1988]. Ограниченный набор участвующих в биологическом круговороте элементов-биофилов в современных моделях ОВ почвы снижает их теоретическую и практическую значимость. Безусловно, кроме углерода и азота должна вычисляться сопряженная с ОВ динамика P, K, Ca, Mg и S, а также имеющих важное генетическое значение Fe и Al, модифицирующих динамику ОВ и азота и их закрепление в почве. Для модели ROMUL уже сделана версия с вычислением динамики кальция при трансформации ОВ почв [Komarov et al., 2012], однако эта работа требует продолжения.

Требует отдельного внимания задача имитации выноса растворенных веществ за пределы почвенного профиля, а также перенос почвенных растворов с боковым стоком, обусловленный особенностями рельефа и почвенного покрова. Планировалось создание модели ROMULSolute для описания выщелачивания элементов из почвенного профиля. Эта задача для будущей работы становится особенно актуальной, учитывая увеличение площади нарушенных земель, где биологический круговорот разомкнут, а учет миграции и выноса веществ может оказывать значительное влияние на восстановление почв. Оценки потоков углекислого газа из почвы, проведенные с помощью модели ROMUL [Надпорожская и др., 2015], адекватны измерениям в полевых условиях. Однако прогнозирование выделения и других парниковых газов, закиси азота и метана, также является перспективной задачей.

Водный и тепловой режим почвы определяют скорость минерализации и трансформации ОВ опада и почвы, и поэтому их определение является необходимым условием для моделирования динамики ОВ почв. Подмодели гидротермических условий присутствуют как в почвенных [Быховец, Комаров, 2002], так обязательно и в экосистемных моделях [Комаров и др., 2007]. Имитируемые климатические параметры в целом неплохо совпадают с реальными измеренными характеристиками. Однако пока они все еще отличаются недостаточной детальностью для отражения специфики изменения температуры и влажности по почвенному профилю. Была обнаружена существенная разница режимов увлажнения и высыхания основной массы лесной подстилки (близка к таковой для минеральных горизонтов) и слоя поверхностного неразложившегося опада с очень динамичным и контрастным режимом [Чертов и др., 2011]. Увлажнение-высыхание подгоризонтов лесной подстилки также значительно зависит от погодных условий, следуя за ними с некоторым отставанием, зависящим от мощности и качества лесной подстилки. Кроме того, для лесных почв необходима параметризация режима проточности по

профилю: из органического горизонта в минеральный А, далее в В и С, что важно для количественной оценки миграции растворенного ОВ по профилю почвы.

Улучшение структуры моделей

В этом отношении наибольшее значение имеют реалистичность и детальность описания при моделировании всего почвенного профиля. В подавляющем большинстве моделей ОВ почвы отсутствует органический горизонт. В модели ROMUL органический горизонт рассматривался обобщенно как свежий опад плюс остальная подстилка, и только в Romul_Hum подстилка представлена всеми тремя подгоризонтами [Комаров и др., 2015]. В большинстве моделей не воспроизводятся вертикальное распределение ОВ и его динамика в почвенном профиле. В специальной модели профильного распределения ОВ [Braakhekke et al., 2011] вертикальный градиент содержания ОВ почвы описывается эмпирически, предполагается поступление ОВ опада исключительно с поверхности почвы, что является только одним из нескольких способов распределения ОВ по профилю. Однако задача состоит в том, чтобы описать формирование ОВ по профилю почвы в зависимости (а) от известных экспериментальных лизиметрических данных о его вымывании из горизонта в горизонт, (б) от данных по распространению корневых систем по профилю в совокупности со скоростями их роста и отмирания и (в) от скорости минерализации и трансформации опадов и гумифицированного ОВ в нижележащих горизонтах. Для решения этой задачи также будет необходим модуль почвенных растворов с протоками по всему профилю для определения роли растворенного ОВ и органо-минеральных соединений в формировании ОВ за пределами биологически активных аккумулятивных горизонтов. Это позволит построить механистическую модель динамики ОВ всего профиля почвы на основе анализа всего объема имеющихся экспериментальных данных.

Неопределенность исходных данных

Одними из внешних обстоятельств, значительно снижающих точность оценок при моделировании динамики ОВ почвы, являются трудности компиляции сценариев опадов (поступающего в почву мертвого органического вещества) как основного материала для гумификации и восполнения потерь ОВ при минерализации. Это касается прежде всего величин корневого опада древесных растений. Дело в том, что наличная биомасса тонких сосущих корней древесных растений обычно меньше биомассы листвы/хвои, и на этом основании делается заключение о меньшем поступлении опада корней в почву. Однако сосущие корни быстро отмирают и снова отрастают в течение вегетационного периода и суммарное количество корневого опада в лесных [Комаров и др., 2007; Persson, 1995] и особенно травяных экосистемах [Базилевич, 1993], в 1,5–5 раз больше наземного. Более того, недостаточно данных по распределению корневого опада по профилю почвы, прежде всего в органическом и гумусовом горизонтах, а также в нижележащих горизонтах.

Недостаточно данных и по доле опада растительности нижних ярусов и напочвенного покрова в лесных сообществах. Отдельную проблему составляют масштабы поступления и темпы разложения крупных древесных остатков, главным образом в отношении их роли в снабжении растений азотом и другими элементами питания, поскольку они составляют значительную долю баланса элементов питания. И это особая доля, т. к. в крупных древесных остатках элементы длительно депонируются и, медленно разлагаясь, возвращаются в почву.

Кроме того, значительное поступление валежа в нетронутых или заповедных лесах может изменять микроклимат, перераспределение тепла, влаги и опада. Все это требует получения дополнительных данных об опаде корней, растений напочвенного покрова и крупных древесных остатков в зависимости от физических и минералогических параметров.

К этой же категории проблем относятся учет и оценку вклада мозаичности почвенного покрова при компиляции сценариев опадов для пространственного моделирования структуры

почвенного покрова природных экосистем. Почвенный покров может отличаться значительной пространственной неоднородностью. Например, в ельниках запасы ОВ в лесной подстилке могут варьировать в 1,5 раза в зависимости от степени увлажненности и микрорельефа [Надпорожская, 2013]. Данные исходной почвы для моделирования вводятся отдельно либо выбирается преобладающий подтип. Запасы органического вещества в минеральном профиле подзолистых почв и подзолов оцениваются для области максимального распространения корней (20–30–40 см). При этом остаются нерешенными вопросы оценки динамики срединных горизонтов аккумуляции ОВ песчаных почв (ВН, ВНФ) и глубинных горизонтов суглинистых почв с повышенным относительным содержанием азота в ОВ, предположительно фиксированном глинистыми минералами.

Проблема оземления подстилки и торфа

Это — отдельная теоретическая проблема, не привлекавшая ранее внимания исследователей. При разложении органического вещества опада хорошо документирована четкая зависимость минерализации свежих растительных остатков от их зольности: чем выше зольность, тем выше скорость минерализации [Надпорожская, 2000, Nadporozhskaya et al., 2006; Berg, McClaugherty, 2008]. Однако если рассматривать минерализацию по градиенту от свежих растительных остатков к гумифицированному материалу в лесных подстилках и торфах, то тут наблюдается прямо противоположная зависимость: чем выше зольность, тем ниже скорость минерализации [Комаров и др., 2007; Chertov et al., 2001]. При этом если взять предельный случай — глубокую трансформацию органического вещества до зольности выше 30 % (что будет соответствовать величинам ниже 30 % углерода по массе этого материала), то это фактически будет уже не органический, а минеральный горизонт, в котором скорость минерализации оказывается самой низкой. Этот процесс в почвоведении имеет название «оземление», в частности «оземление торфа» [Шишов и др., 2004], хотя он также рассматривается и как «брюнификация» [<http://racechrono.ru/pochvoobrazovatelnye-processy/25-bryunifikaciya.html>]. Однако этот феномен количественно не описан, что не позволяет использовать величины зольности гумифицированного органического вещества для калибровки коэффициентов его минерализации в моделях динамики органического вещества почв и проследить долгосрочную трансформацию или деградацию органических горизонтов почв под влиянием антропогенных воздействий (осушения, ирригации, удобрения, техногенного загрязнения).

Заключение

В настоящее время математическое моделирование в экологии постепенно становится одним из инструментов экологического нормирования, оценки эффективности и принятия решений в природопользовании как компонент наукоемкой экономики. Однако роль почвенных процессов до сих пор недооценивается при построении математических моделей экосистем и оценках экологического состояния территории. Приведенные материалы наглядно показывают, что по мере развития моделирования динамики ОВ почв возникает все более широкий круг задач для включения в существующие и новые динамические модели. Это прежде всего оценка работоспособности существующих теоретических концепций, решение проблемы качества исходных данных, детализированный учет гидротермических условий трансформации ОВ в почве, оценка его распределения по профилю почвы с учетом вертикальной и горизонтальной миграции ОВ, рассмотрение роли минералогического состава почвы на динамику ОВ и азота, включение биологических механизмов гумусообразования с количественным определением роли почвенной фауны. Решение этих задач совершенно необходимо для дальнейшего совершенствования и практического использования моделей динамики ОВ почвы для прогнозных оценок воздействия деятельности человека на почвы, экосистемы и в целом на биосферу.

В заключение следует подчеркнуть, что серьезными факторами, сдерживающими развитие математического моделирования ОБ почв, служат неоднородность методов определения и недостаточность экспериментальных данных для построения моделей. Эта проблема существует с самых ранних этапов развития математического моделирования. В этой связи возникает задача создания эффективной обратной связи между разработчиками моделей и экспериментаторами для восполнения обнаруживаемых при создании моделей пробелов в экспериментальных данных.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. А. Ларионовой и П. Я. Грабарнику, чьи замечания позволили существенно улучшить содержание работы.

Список литературы

- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. — М.: Наука, 1993.
- Быховец С. С., Комаров А. С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. — 2002. — № 4. — С. 443–452.
- Комаров А. С., Чертов О. Г., Быховец С. С., Шапков М. П., Фролов П. В. Модель гумификации органического вещества почв Romul_Hum с учетом деятельности почвенной фауны // Математическое моделирование в экологии; Материалы IV Национальной научной конференции с международным участием, 18–22 мая 2015 г. / Ред. А. С. Комаров. — Пушкино: ИФХиБПП РАН. — 2015. — С. 87–90.
- Комаров А. С., Чертов О. Г., Надпорожская М. А. и др. Моделирование динамики органического вещества лесных почв / Отв. ред. В. Н. Кудеяров М.: Наука, 2007. — 380 с.
- Костычев П. А. Образование и свойства перегноя. — 1889. — Цит. по: Костычев П. А. Избранные труды. — Л.: Наука, 1951. — С. 251–296.
- Надпорожская М. А. Моделирование трансформации органического вещества в почве: Автореферат дис. канд. с.-х. н. — СПб.: Санкт-Петербургский аграрный ун-т, 2000. — 20 с.
- Надпорожская М. А., Абакумов Е. В., Чертов О. Г., Комаров А. С. Математическое моделирование как инструмент для анализа экологического состояния северных почв и способ формирования системного подхода в изучении ресурсов арктического региона // Комплексные научные исследования и сотрудничество в Арктике: взаимодействие вузов с академическими и отраслевыми научными организациями: Материалы Всероссийской конференции с международным участием [Электронный ресурс] / Сост. С. В. Рябченко. — Архангельск: ИД САФУ, 2015. — С. 280–283.
- Надпорожская М. А. Обработка полевых данных для вычислительных экспериментов с математической моделью ROMUL // Математическое моделирование в экологии: Материалы III Национальной научной конференции с международным участием, 21–25 октября 2013 г. — Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2013. — С. 180–181.
- Чертов О. Г. Экология лесных земель. Почвенно-экологическое исследование лесных местобитаний. — Л.: Наука, 1981. — 192 с.
- Чертов О. Г. Количественная оценка продуктов метаболизма и мортмассы почвенной фауны как материала для гумификации в лесных почвах // Почвоведение. — 2016. — № 1. — С. 88–99.
- Чертов О. Г., Комаров А. С. Теоретические основы моделирования динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. — 2013. — № 8. — С. 937–946.
- Чертов О. Г., Комаров А. С., Смирнов А. П., Лаурен А. Моделирование динамики влажности лесного опада для оценки его минерализации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2011. — Вып. 197. — С. 283–294.

- Шаяхметова А. Ф., Якконен К. Л., Надпорожская М. А.* Влияние полуторных оксидов на отношение валовых азота и углерода в лесных подстилках сухих сосновых лесов // Рациональное использование природных ресурсов и проблемы сохранения биоразнообразия: Материалы X ежегодной молодежной экологической Школы-конференции в усадьбе «Сергиевка» памятнике природы и культурного наследия 2015 год. — Санкт-Петербург, Старый Петергоф, 26–27 ноября 2015. — СПб.: Изд-во ВВМ. — 2015. — 267 с. — С. 94–98.
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И.* Классификация почв России М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2004.
- Berg B., McClaugherty C.* Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. — 2008.
- Braakhekke M. C., Beer C., Hoosbeek M. R., Reichstein M., Kruijt B., Schrumppf M., Kabat P.* SOM-PROF: A vertically explicit soil organic matter model // *Ecol. Model.* — 2011. — Vol. 222. — P. 1712–1730.
- Chertov O. G., Komarov A. S.* SOMM: a model of soil organic matter dynamics // *Ecol. Model.* — 1997. — Vol. 94. — P. 177–189.
- Chertov O. G., Komarov A. S., Nadporozhskaya M. A., Bykhovets S. S., Zudin S. L.* ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // *Ecol. Model.* — 2001. — Vol. 138. — P. 289–308.
- Holtkamp R., van der Wal A., Kardol P., van der Putten W. H., de Ruiter P. C., Dekker S. C.* Modeling C and N mineralisation in soil food webs during secondary succession on ex-arable land // *Soil Biol. Biochem.* — 2011. — Vol. 43, No. 2. — P. 251–260.
- Huang C.-Y., Hendrix P. F., Fahey T. J., Bohlen P. J., Groffman P. M.* A simulation model to evaluate the impacts of invasive earthworms on soil carbon dynamics // *Ecol. Model.* — 2010. — Vol. 221, No. 20. — P. 2447–2457.
- Kätterer T., Andrén O.* The ICBM family of analytically solved models of soil carbon, nitrogen and microbial biomass dynamics — descriptions and application examples // *Ecol. Model.* — 2001. — Vol. 136. — P. 191–207.
- Kögel-Knabner I., Matzner E.* (eds.) Soils as a source and sink for CO₂ — Mechanisms and regulation of organic matter stabilisation in soils // *Plant Nutrition and Soil Science.* — 2008. — Vol. 171. — P. 1–132.
- Komarov A. S., Khoraskina Yu. S., Bykhovets S. S., Bezrukova M. G.* Modelling of soil organic matter and elements of soil nutrition dynamics in mineral and organic forest soils: the ROMUL model expansion // *Procedia Environmental Sciences.* — 2012. — No. 13. — P. 525–534.
- Manzoni S., Porporato A.* Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales // *Soil Biol. Biochem.* — 2009. Vol. 41, No. 7 — P. 1355–1379.
- Nadporozhskaya M. A., Mohren G. M. J., Chertov O. G., Komarov A. S., Mikhailov A. V.* Soil organic matter dynamics at primary and secondary forest succession on sandy soils in The Netherlands: an application of soil organic matter model ROMUL // *Ecol. Model.* — 2006. — Vol. 190, No. 3/4. — P. 399–418. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.025>.
- Parton W. J., Stewart J. W. B., Cole C. V.* Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: f model // *Biogeochemistry.* — 1988. — Vol. 5. — P. 109–131.
- Persson H.* The role of roots in carbon cycling in forests / Eds. H.-S. Helmisaari, A. Smolander, A. Suokas. The Role of Roots, Mycorrhizas and Rhizosphere Microbes in Carbon Cycle in Forest Soil // *Finnish Forest Res. Inst. Res. Paper.* — 1995. — No. 537. — P. 119–126.
- Zanella A., Jabiol B., Ponge J. F., Sartori G., De Waal R., Van Delft B., Graefe U., Cools N., Katzensteiner K., Hager H.* Englisch M. European morpho-functional classification of humus forms // *Geoderma.* — 2011. — Vol. 164, No. 3–4. — P. 138–145