

УДК 631.4:631.46:573.3:574.44

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ROMUL И Romul_Hum ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO₂ И ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ ПОД ЛИСТВЕННЫМ ЛЕСОМ В ЮЖНОМ ПОДМОСКОВЬЕ

© 2020 г. И. В. Припутина^{a, *}, С. С. Быховец^a, П. В. Фролов^a, О. Г. Чертов^b, И. Н. Курганова^a,
В. О. Лопес де Гереню^a, Д. В. Сапронов^a, Т. Н. Мякшина^a

^aИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пушкино, Московская область, 142290 Россия

^bБингенский технический университет, Берлинштрассе, 109, Бинген, 55411 Германия

*e-mail: priputina@pbcras.ru

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Выполнена проверка (валидация) моделей ROMUL и Romul_Hum по данным многолетних измерений почвенного дыхания, проводимых ИФХиБПП РАН в южном Подмоскowie (54°50' N, 37°34' E). Для серой лесной почвы (Albic Luvisol) под вторичным лиственным лесом получены оценки динамики запасов углерода и почвенной эмиссии CO₂ для трех сценариев растительного опада, скомпированных с учетом экспериментальных данных по составу и массам опада. Расчеты многолетних рядов значений температуры и влажности лесной подстилки и верхних органо-минеральных горизонтов в имитационных экспериментах основаны на реальных данных по температуре воздуха и осадкам за 1973–2016 гг. Результаты вычислений на основе модели Romul_Hum, в которой реализовано описание эффектов, связанных с жизнедеятельностью почвенной фауны, приводящих к образованию разных фракций органического вещества почв, показали большее соответствие данным полевых измерений. Эмиссия CO₂, запасы углерода и отношение C : N в горизонтах серой лесной почвы лучше соответствовали натурным данным в сценариях опада, исключавших поступление фракции ветвей. Выявленные различия между имитируемыми и фактическими показателями почвы объясняются особенностями поступления и трансформации разных фракций опада, что не всегда учитывается при отборе почвенных проб. Результаты исследования заставляют обратить внимание на необходимость анализа неопределенности оценок углеродного баланса в лесных экосистемах не только в связи со сложностью учета крупных древесных остатков (сухостоя и валежа), но и в отношении более мелких фракций древесного опада.

Ключевые слова: имитационные модели, фракции опада, почвенная биота, минерализация, эмиссия CO₂

DOI: 10.31857/S0032180X20100159

ВВЕДЕНИЕ

Роль почвенных математических моделей как современного инструмента для анализа и прогноза состояния почвенного покрова и экологических изменений, связанных с хозяйственной деятельностью человека или неблагоприятными природными явлениями, является общепризнанной [38, 62, 68, 70]. В почвенном имитационном моделировании, как и в экспериментальном почвоведении, повышенное внимание уделяется процессам минерализации и образования органического вещества почв (ПОВ) с ориентацией, в первую очередь, на математическое описание динамики пулов и интенсивности потоков углерода [71, 72]. Моделей, описывающих процессы внутрипочвенного цик-

ла азота и совместную динамику C и N, существенно меньше [65, 73].

Теоретические подходы, используемые при моделировании динамики ПОВ, подробно рассмотрены, например, Рыжовой [29] и Чертовым и Комаровым [36]. В самом общем виде модели ПОВ описывают трансформацию вещества из органических в неорганические соединения в результате процессов, контролируемых схожими биогеохимическими ограничениями. Собственно процесс минерализации рассматривается как биологически опосредованная серия реакций, где органические субстраты превращаются в живую биомассу и минеральные остатки [65]. Сложный состав соединений растительного опада и ПОВ,

их разная устойчивость к деградации может быть учтена через соответствующие скорости оборачиваемости и время пребывания в разных пулах углерода [11, 22].

В обзоре Манзони и Парторато [61] упоминается о 250 моделях динамики ПОВ, созданных с 1930-х по 2000-е годы (включая 7 ссылок на работы российских авторов [15, 39, 40, 64, 66, 74, 78]). Бóльшая часть включенных в обзор моделей ориентирована на агропочвы. В меньшем числе моделей имитируются процессы образования органического вещества в лесных почвах [60], для которых характерны более сложное строение почвенного профиля, разновременная динамика поступления видоспецифичного растительного опада и особенности его биохимической трансформации, [1, 2, 9, 51, 73]. Некоторые из известных моделей агропочв на сегодняшний день имеют “лесные” версии [55, 65, 76], что связано со значительной ролью лесов и лесных почв в депонировании CO_2 атмосферы [48].

Семейство моделей ROMUL, созданных коллективом исследователей из Пушино и Санкт-Петербурга, изначально ориентировано на моделирование динамики лесных почв. Первым шагом на пути их создания была компиляция модели динамики лесной подстилки [34]. Она была разработана с использованием доступных на тот момент данных по скорости разложения подстилки в лабораторных условиях. Отличительной чертой модели был акцент не только на минерализацию, но и на гумификацию разлагающегося материала. Была предложена концепция “комплекса гумусовых веществ с неразложившимися растительными остатками” (complex of humic substances или CHS) как один из механизмов закрепления гуминовых кислот в ПОВ и замедления скорости минерализации остаточного неразложившегося материала.

В дальнейшем к исходной модели лесной подстилки был добавлен блок органического вещества минеральных горизонтов почв, что позволило более полно имитировать динамику всего ПОВ. Скорости минерализации и гумификации ПОВ в этой новой модели SOMM (Soil Organic Matter Model) [35, 40] также были скомпилированы на основе имеющихся экспериментальных данных. Модель SOMM прошла верификацию и сравнение с девятью другими динамическими моделями ПОВ, показав хорошие результаты в сопоставлении со столетними рядами наблюдений за динамикой ПОВ на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) и, особенно, с результатами некоторых других моделей, потребовавших специфической калибровки для отдельных объектов [41, 70]. Модель была полностью интегрирована в первую версию процессной модели лесной экосистемы EFIMOD (European

Forest Institute MODel) [42] и использована, например, для оценки скорости восстановления почв при рекультивации промышленных отвалов в Германии [43].

В последствии модель SOMM была существенно улучшена за счет корректировки по новым экспериментальным данным Надпорожской [24, 25] и другим публикациям, получив имя ROMUL (от немецкого ROhhumus MUL) [44]. Модель ROMUL, имеющая Свидетельство о государственной регистрации [31], также была интегрирована в EFIMOD и применялась для решения теоретических и практических задач не только в России [26, 52, 59, 63].

Модель Romul_Hum — следующая модификация в этом семействе моделей. Ее детальное описание дано в работах Комарова и Чертова с соавт. [45, 46, 54]. Помимо процессов минерализации ПОВ, связанных с микробным дыханием, в Romul_Hum более детально реализовано описание эффектов, обусловленных жизнедеятельностью почвенной фауны, приводящих к образованию разных фракций ПОВ. Это позволило перейти к количественной оценке вклада почвенной биоты в формирование эмиссионных потоков CO_2 из почв и в процессах стабилизации ПОВ. С этой целью в сохраненную от ROMUL структуру модели включены два дополнительных модуля. Первый — описывает детритные пищевые цепи почвенной микро- и мезофауны с образованием экскрементов и некромассы, как компонентов ПОВ, и выделением CO_2 в процессе дыхания почвенной биоты. Второй блок описывает отдельно процессы трансформации растительного опада, связанные с жизнедеятельностью дождевых червей [46]. Новые модули позволяют количественно оценить вклад трудноучитываемых в условиях реальных почв продуктов жизнедеятельности почвенной фауны (экскрементов и некромассы) в образование устойчивых форм ПОВ и связывание углерода, что соответствует представлениям о роли почвенной биоты в процессах почвообразования и депонирования C в наземных экосистемах [6, 8].

Первоначальное тестирование Romul_Hum было выполнено по данным о запасах ПОВ в разновозрастных залежах [53, 54]. Проверки на соответствие экспериментальным данным для модели ROMUL также проводились в основном по данным динамики ПОВ [63, 70]. Но модели позволяют рассчитывать величину эмиссии CO_2 в результате минерализации ПОВ, поэтому их параллельная проверка по этой переменной представляет актуальность для оценки и прогнозирования вклада лесных почв в эмиссию парниковых газов. Натурными данными для этого может быть накопленный в ИФХиБПП РАН многолетний ряд еженедельных измерений почвенной эмиссии CO_2 , прово-

Таблица 1. Состав и масса фракций растительного опада, отобранного из опадоуловителей, размещенных на участке мониторинга эмиссии CO₂ (данные за 2010–2016 гг.)

Компонент опада	Масса опада, кг/м ² в год		% от суммарной массы опада min–max
	среднее за 6 лет	min–max	
Листья	0.382	0.304–0.432	46.4–76.2
Крылатки липы	0.013	0.005–0.031	0.8–4.4
Крылатки клена	0.011	0.002–0.018	0.3–3.2
Почки	0.036	0.023–0.051	4.2–7.9
Древесные части (ветки)	0.099	0.049–0.167	9.5–25.5
Всего	0.611	0.515–0.698	

димых с середины 1990-х гг. в южном Подмоскowie [17, 18, 56].

В статье представлены результаты вычислительных экспериментов по оценке эмиссии CO₂ и динамики ПОВ для серой лесной почвы под осиново-широколиственным древостоем, выполненные на основе моделей ROMUL и Romul_Hum. Сравнительный анализ результатов моделирования и данных полевых измерений позволяет судить о точности модельных расчетов в отношении эмиссии CO₂ из лесных почв. Еще одной целью работы было выявить различия в оценках динамики ПОВ и эмиссионных потоков CO₂, связанные с модификацией алгоритма в модели Romul_Hum.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Участок, на котором непрерывно, начиная с ноября 1997 г. проводили круглогодичные еженедельные измерения почвенной эмиссии CO₂, расположен в Московской области на правом берегу р. Оки вблизи г. Пушкино (54°50' N, 37°34' E), в верхней относительно пологой части склона северной экспозиции. Исследуемая почва – серая лесная суглинистая на покровном суглинке (Albic Luvisol) [14, 77] находится под вторичным листовым лесом. На момент начала мониторинговых исследований средний возраст древостоя составлял примерно 50 лет. В основном ярусе древостоя преобладали осина (*Populus tremula* L.), липа (*Tilia cordata* Mill.) и береза (*Betula* spp.), в подросте – клен (*Acer platanoides* L.). Напочвенный покров представлен неморальными видами *Galeobdolon luteum* Huds. и *Aegopodium podagraria* L., в первой половине вегетационного сезона широко распространена *Pulmonaria obscura* Dum. Существенных изменений видового состава фитоценоза за период наблюдений не произошло.

Информация о почвенных характеристиках, методика и данные измерений эмиссии CO₂ опубликованы ранее [17, 18, 56]. Отметим, что эмиссионный поток CO₂ из почв при используемой технике

измерений представляет собой общее дыхание почвы (микробное и корневое) и дыхание подстилки.

Источники информации для входных данных и имитационных сценариев. Почвенный профиль в моделях ROMUL и Romul_Hum условно разделен на два слоя: органогенный (соответствующий лесной подстилке) и органо-минеральный (в случае исследуемой почвы он объединяет горизонты A1, A2B, B1). В модели ROMUL процессы последовательного преобразования растительного опада в органогенном горизонте описываются отдельно для опада текущего года (L) и растительных остатков предшествующих лет (соответствующих представлениям о CHS), что близко условиям ферментативного типа подстилки [2]. В Romul_Hum использовано классическое разделение подстилки на подгоризонты L, F, H [50], которые соответствуют горизонтам O1, O2, O3 подстилок гумифицированного типа [33], преобладающего на участке мониторинга.

Начальные запасы органического вещества, азота и величины C : N в почве, использованные в имитационных экспериментах в качестве входных данных, рассчитаны по имеющимся для этого участка данным. Запас лесной подстилки рассчитывался без разделения на подгоризонты L, F, H из-за ее малой мощности. Запасы органического вещества в подстилке составляют 0.25 кг C/м², в органо-минеральной части профиля – 7.17 кг C/м², а соответствующие им значения C : N равны 25 и 12.3.

Поступление растительного опада на поверхность почвы оценивалось по данным измерений поступления листвы, почек, крылаток и древесного материала (веток), которые отбирали из опадоуловителей в трехкратной повторности ежемесячно в течение 2010–2015 гг. (табл. 1) [30]. Шаг моделирования (1 месяц) в моделях ROMUL и Romul_Hum совпадает с периодичностью сбора растительного материала из опадоуловителей. Это позволило использовать в расчетах для конкретных месяцев соответствующие им данные по

Таблица 2. Сценарии поступления опада и показатели C : N разных фракций опада в имитационных экспериментах, кг/(м² мес.)

Месяц/сценарий	Древостой			Лесное широкотравье	
	листья (C : N = 42)	ветви (C : N = 100)	корни (C : N = 42)	надземные органы (C : N = 28)	корни (C : N = 42)
Поступление опада					
Январь	0	0	0.0204	0	0.00033
Февраль	0	0	0.0204	0	0.00033
Март	0.0033	0.0118	0.0204	0	0.00033
Апрель	0.0057	0.0068	0.0204	0.0008	0.00033
Май	0.0094	0.0090	0.0204	0.0016	0.00033
Июнь	0.0041	0.0044	0.0204	0.0024	0.00033
Июль	0.0046	0.0033	0.0204	0.0024	0.00033
Август	0.0074	0.0031	0.0204	0.0040	0.00033
Сентябрь	0.0455	0.0074	0.0204	0.0032	0.00033
Октябрь	0.1059	0.0081	0.0204	0.0016	0.00033
Ноябрь	0.0051	0.0047	0.0204	0	0.00033
Декабрь	0	0	0.0204	0	0.00033
Набор опада					
LV&BR	+	+	+	–	–
LV	+	–	+	–	–
LV&HR	+	–	+	+	+

массам фракций опада, исходя из средних значений за 6-летний период (табл. 2).

Не располагая экспериментальными данными для оценки массы корневого опада древостоя, использовали оценки из работы [47]. Для опада тонких корней была принята величина, равная 150% массы ежегодного опада листвы, а его поступление в течение года считали равномерным.

В отсутствии данных по опадению растений на почвенного покрова использовали оценки для лесов схожего видового и возрастного состава на серых лесных почвах [28]. Считали, что масса поверхностного опада трав составляет 10% от массы опада листвы, но характер поступления этой фракции в течение года в имитационных сценариях отличался от листвы. В частности, учтено отмирание наземных органов первоцветов, которое происходит уже в июне–июле. Корневой опад трав принят равным 25% от массы их поверхностного опада [16]. Весь корневой опад в расчетах считали поступающим в органо-минеральную часть почвенного профиля, что соответствует условиям исследуемого фитоценоза.

Данные о содержании C и N для трех фракций поверхностного опада (листья, мелкие ветви и травы) и двух фракций корневого опада (тонкие корни деревьев и корни трав) были получены в

разные годы исследований и из литературы [49]. Отношение C : N в рассматриваемых фракциях отражено в табл. 2.

Вычислительные эксперименты включали три сценария растительных опадов. Первый соответствовал структуре и массе опада, собранного из опадоуловителей и включающего листья и ветви, а также учитывал корневой опад деревьев (условное обозначение LV&BR). Второй предполагал поступление на поверхность почвы только листового опада и корневого опада древостоя в органо-минеральную часть профиля (сценарий LV). В третьем поверхностный опад включал листья и травы, а внутрипочвенный – корни деревьев и трав (сценарий LV&HR). Средние значения C : N в суммарных опадах для сценариев убывают в ряду: LV&BR > LV > LV&HR, что позволило проанализировать отклик моделей на качество поступающего опада.

Климатические данные для расчета гидротермических условий в почве. Помимо качества опадов, интенсивность минерализация ПОВ в моделях ROMUL и Romul_Hum зависит от температуры и влажности подстилки и органо-минеральных горизонтов. Соответствующие им многолетние ряды значений были рассчитаны с использованием модели SCLISS (Soil CLimate Statistical Simulator) [4, 22]

на основе данных по температуре воздуха и осадкам, полученных на Станции комплексного фоновое мониторинга Приокско-Тerrasного заповедника (СКФМ ПТЗ) за 1973–2016 гг. [19, 27]. Продолжительность имитационного сценария по сравнению с фактическим периодом измерений CO_2 была увеличена, так как это необходимо для начальной “раскрутки” (spin-up) модели. Значения водно-физических констант (влажность завядания, наименьшая полевая влагоемкость и полная влагоемкость) были оценены: для подстилки – по ее плотности, согласно зависимостям, полученным нами ранее по литературным данным [3]; для органо-минеральных горизонтов – по гранулометрическому составу и содержанию органического вещества, согласно [67]. Выборки наиболее влажных (1998, 2006, 2008, 2013, 2016) и сухих (2002, 2007, 2009, 2010, 2014) лет за рассматриваемый период мониторинга эмиссии CO_2 (1998–2016) получены на основе сравнения значений летнего гидротермического коэффициента с климатической нормой по этому показателю [18, 19].

Модели ROMUL и Romul_Num позволяют учесть в имитационных оценках *поступление азота с атмосферными выпадениями*, которое в наших расчетах было принято равным 6 кг/га в год (или 0.00005 кг N/м² в месяц), исходя из данных для СКФМ ПТЗ [7, 32]. В сценариях была реализована зависимость поступления азота с атмосферными выпадениями от среднемесячной температуры воздуха (t). При $t < 0^\circ\text{C}$ поступления азота в почву не происходит, что условно соответствует его аккумуляции в снежном покрове. Но если в следующий за этим месяц (как правило, март или апрель) $t > 0^\circ\text{C}$, то считали, что в почву поступает одновременно и азот предшествующих “зимних” месяцев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики запасов углерода. Сценарий LV&BR. В этом сценарии, максимально соответствующем данным опадоуловителей, обе модели показывают заметное увеличение запасов углерода в лесной подстилке по сравнению с начальным значением, рассчитанным по данным полевых исследований (рис. 1). Рост запасов происходит в первые 10–15 лет, после чего углеродный пул подстилки относительно стабилизируется на уровне 1.0 кг С/м² для модели ROMUL и 0.85 кг С/м² для Romul_Num, что в 3–4 раза превышает натурные данные. Такой характер изменений указывает на явное несоответствие между количеством поступающего опада и интенсивностью его минерализации. При этом обе модели показывают изменение запасов подстилки в течение года до 0.1 кг С/м², что

хорошо согласуется с количеством поступающего свежего опада (табл. 2).

Для органо-минеральной части профиля, модель Romul_Num, показывает увеличение запасов примерно на 2 кг С/м² по сравнению с начальным значением и слабую внутригодовую динамику. В оценках с использованием модели ROMUL, напротив, углеродный пул органо-минеральной части профиля для всего периода моделирования сохраняется на уровне начального значения, но его внутригодовая динамика выражена более отчетливо.

Суммарное изменение запасов ПОВ за моделируемый период (44 года) составило для сценария LV&BR по оценкам модели ROMUL 0.754 кг С/м² (или 0.017 кг С/м² в год). Оценки Romul_Num заметно выше и составляют 2.616 кг С/м² (или 0.059 кг С/м² в год). В работе Ларионовой с соавт. [57] для исследуемой почвы приводятся экспертные оценки накопления ПОВ, соответствующие аккумуляции 0.039 кг С/м² в год для слоя 0–20 см и 0.063 кг С/м² в год для слоя 0–60 см. Результаты, полученные на основе модели Romul_Num, сопоставимы с этими данными, но наблюдается явное отличие запасов подстилки в имитационном эксперименте от полевых данных.

Анализируя причины подобного несоответствия, следует отметить, что показанный моделью рост запасов углерода в подстилке происходит на фоне изменения величин С : N с начальных 25 до 50–54 в модели ROMUL и до 30 в Romul_Num. Именно это объясняет недостаточную интенсивность “минерализации” материала подстилки, которая имитируется, исходя из значений С : N в соответствующих подгоризонтах. Высокие показатели С : N моделируемой подстилки – это результат “усреднения” значений С : N двух фракций опада пропорционально их массам: листовы (С : N = 42) и веток (С : N = 100). Но в реальных условиях опад ветвей в данном типе леса относительно фрагментарно локализован на поверхности почвы в отличие от равномерного распределения листового опада. Кроме того, присутствующие на поверхности почвы ветви при отборе подстилки не всегда включаются в ее состав и, таким образом, практически не учитываются в анализе.

Сценарий LV. Динамика и показатели запасов углерода в подстилке в случае формирования поверхностного опада только за счет листовы заметно отличаются от рассмотренного выше (рис. 1), но и для этого сценария расчеты показывают примерно двухкратное повышение запасов относительно начального значения.

В органо-минеральной части почв характер динамики и показатели запасов ПОВ меняются не так явно, как в подстилке. Однако модель ROMUL для

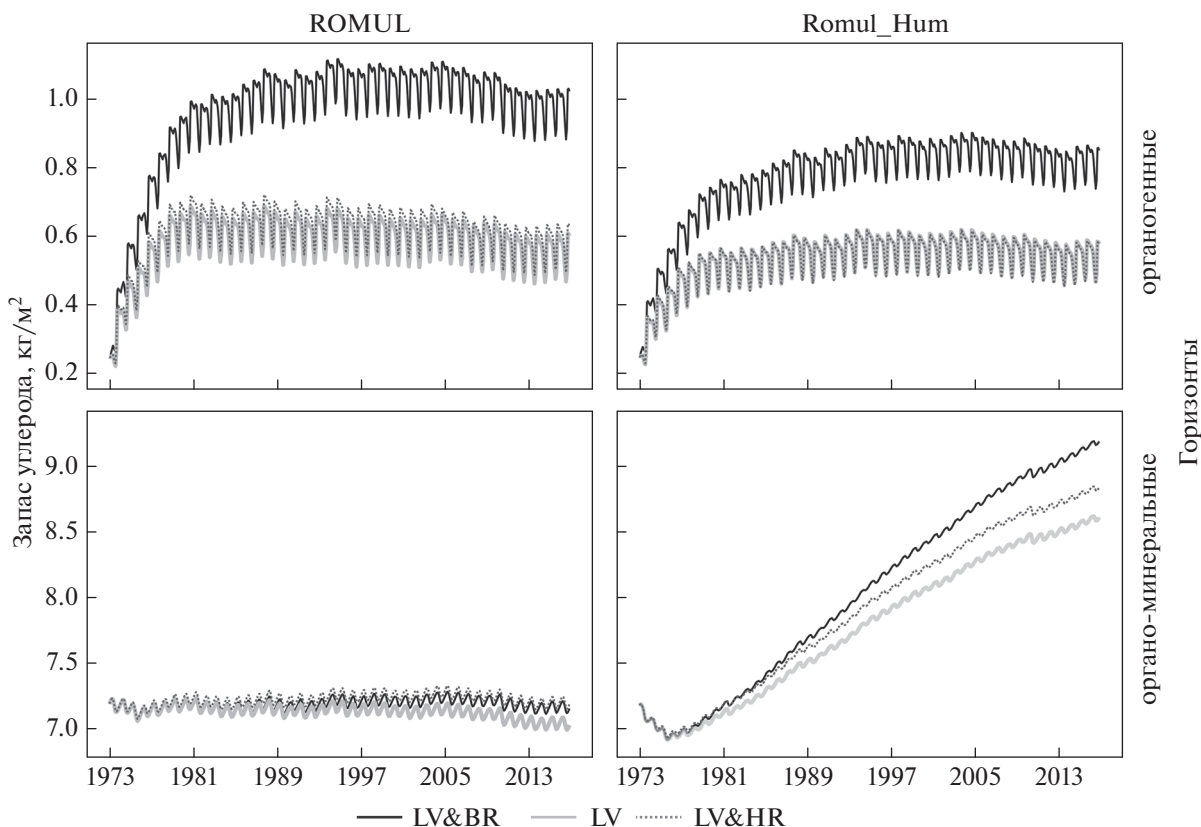


Рис. 1. Динамика запасов углерода по данным вычислительных экспериментов при разных сценариях поступающего опада: LV&BR – поверхностный опад включает листву и ветки, внутрипочвенный – тонкие корни деревьев; LV – поверхностный опад – только листья, внутрипочвенный – тонкие корни деревьев; LV&HR – поверхностный опад включает листву и травы, внутрипочвенный – тонкие корни деревьев и корни трав.

данного сценария показывает сокращение почвенного пула углерода на 2% в сравнении с начальным запасом, что свидетельствует о недостаточном количестве опада, поступающего в данном случае только с листвой и корневым опадом древостоя. Результаты расчетов Romul_Hum соответствуют повышению запасов на 1.4 кг С/м², что ниже аналогичного показателя в предыдущем сценарии.

Суммарное изменение запасов ПОВ в исследуемой почве за период моделирования составило по оценкам модели ROMUL 0.205 кг С/м² (или 0.005 кг С/м² в год). Расчеты на основе Romul_Hum соответствуют накоплению 1.762 кг С/м² (или 0.040 кг С/м² в год). В обоих случаях полученные нами скорости накопления углеродного пула ниже имеющихся оценок [57].

Сценарий LV&HR. Для органогенного горизонта результаты вычислений с использованием данного сценария поверхностных опадов (листья и травы) практически совпадают с результатами в сценарии LV. Повышенное содержание азота в

опаде трав, по-видимому, нивелирует небольшую разницу в количестве опада между этими сценариями за счет его более быстрой минерализации в сценарии LV&HR. Минимум запасов органического вещества в подстилке, характерный для летнего периода, в оценках модели Romul_Hum соответствует снижению углеродного пула в подгоризонтах L и F, тогда как в подгоризонте H изменений практически нет (рис. 2). Показанное для L–F–H соотношение хорошо согласуется с литературными данными [33], согласно которым около половины от общих запасов подстилок гумифицированного типа приходится на подгоризонт H. Внутригодовая динамика углеродного пула подстилки также объясняет различия запасов между измеренным значением (определявшимся по данным середины вегетационного сезона) и расчетным (среднее за год).

Для органо-минеральной части профиля отличия от других сценариев заметнее. Модель ROMUL для этого сценария показывает более высокие запасы ПОВ, что логично объясняется дополнительным поступлением опада трав. Но в целом,

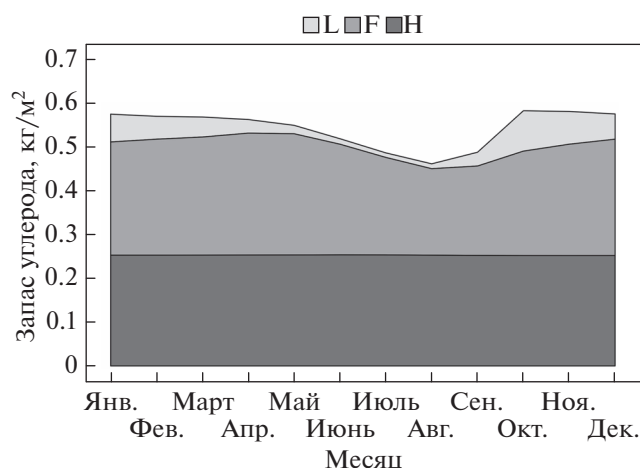


Рис. 2. Накопительная диаграмма внутригодовой динамики запасов углерода в подгоризонтах L, F, H лесной подстилки по результатам вычислительного эксперимента с использованием модели Romul_Num для сценария LV&HR (гидротермические условия соответствуют 2016 г.).

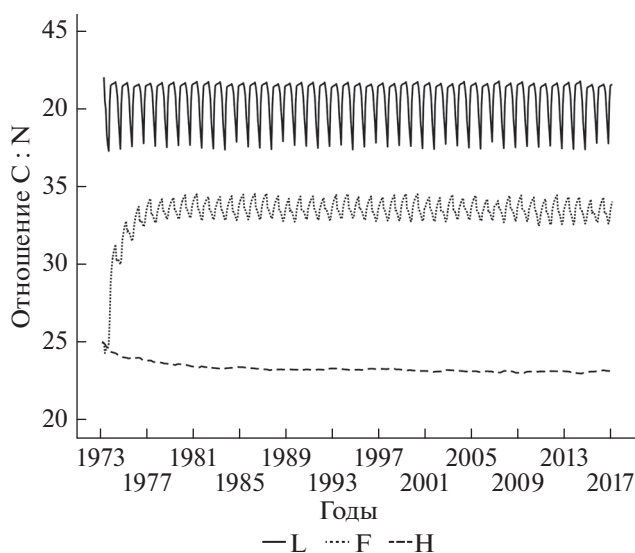


Рис. 3. Динамика величины C : N в горизонтах L, F, H лесной подстилки по результатам вычислительного эксперимента с использованием модели Romul_Num для сценария LV&HR.

углеродный пул для органико-минеральной части профиля в расчетах ROMUL практически не изменяется. Оценки на основе Romul_Num, напротив, показывают рост на 1.665 кг С/м^2 , что выше, чем в сценарии опадов только листвы, но ниже по сравнению с вариантом поверхностного опада, включающего листву и ветви.

Суммарное изменение запасов ПОВ для сценария LV&HR составило по оценкам моде-

ли ROMUL 0.392 кг С/м^2 (или 0.009 кг С/м^2 в год). Оценки Romul_Num существенно выше — 1.989 кг С/м^2 за весь период моделирования (или 0.045 кг С/м^2 в год), и максимально совпадают с имеющимися данными для исследуемой почвы [57].

Дополнительным аргументом в пользу данного сценария и соответствующих ему оценок Romul_Num служат результаты анализа динамики C : N в подгоризонтах лесной подстилки в течение года (рис. 3). Полученные данные отражают последовательное уменьшение для L–F–H величин C : N как результат минерализации растительных остатков и их преобразования почвенной биотой в устойчивое ПОВ, что в модели регулируется качеством органического вещества и внутригодовой динамикой гидротермических условий. Величина C : N, равная 25, в отобранных в летний период образцах подстилки без ее разделения на подгоризонты, хорошо согласуется с рассчитанными в этом сценарии соотношениями запасов и значениями C : N в L–F–H для середины вегетационного сезона (рис. 2, 3).

Сравнительный анализ модельных оценок и данных полевых измерений CO_2 . Результаты вычислительных экспериментов показали, что модель ROMUL для всех сценариев опадов показывает более высокую суммарную годовую эмиссию CO_2 в сравнении с оценками на основе модели Romul_Num (табл. 3). Следует подчеркнуть, что в данном случае эмиссия связана только с минерализацией растительных остатков и ПОВ и не учитывает корневое дыхание растений, вклад которого в случае лесных фитоценозов составляет по экспериментальным данным около 30% [10, 20]. Исходя из этого, значение средней суммарной годовой эмиссии CO_2 , полученное по результатам полевых измерений, было пересчитано в величину потенциальной гетеротрофной эмиссии (табл. 3). Сравнение полученной величины с данными модельных оценок показало хорошее соответствие результатов вычислений для модели Romul_Num.

Анализируя динамику эмиссии CO_2 (рис. 4), можно отметить, что для зимнего периода, когда интенсивность дыхания корней растений минимальна, результаты моделирования близки к измеренным потокам, но изменчивость рассчитанных величин в этот период ниже, чем измеренных. Это может объясняться тем, что модели не учитывают влияние снежного покрова на эмиссионные потоки (скорости диффузии CO_2 сквозь снежный покров). Согласно расчетам, модели лучше воспроизводят эмиссию CO_2 во влажные годы, чем в сухие, когда влажность является фактором, лимитирующим активность почвенной микробиоты, участвующей в процессах минерализации ПОВ (рис. 5).

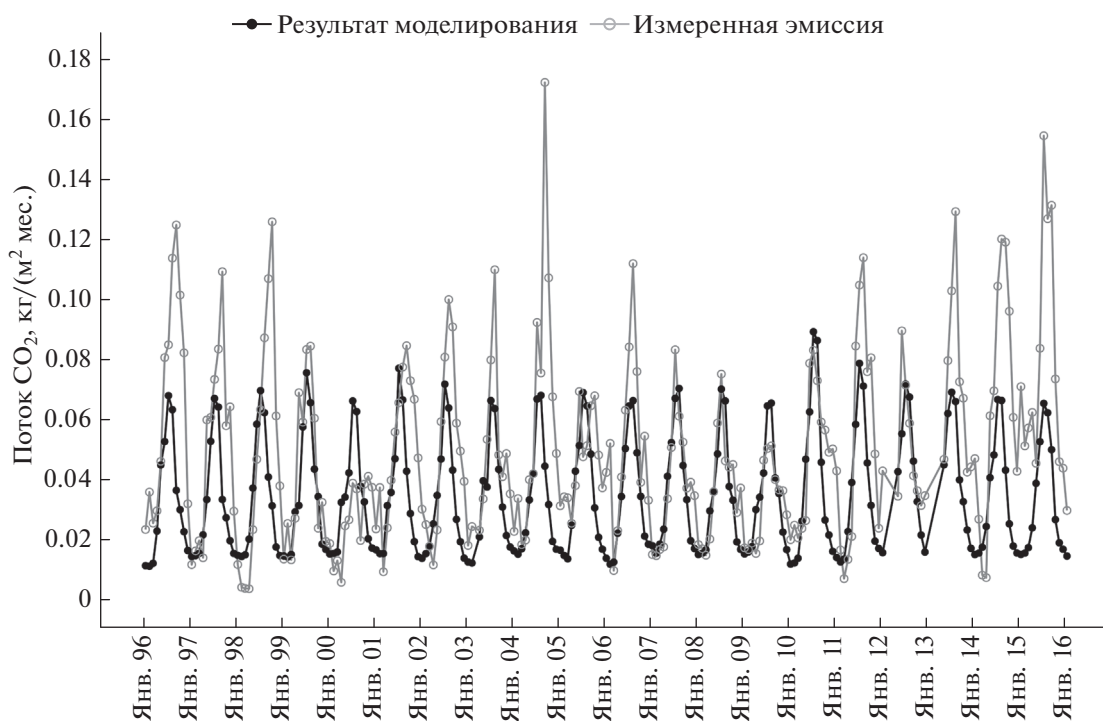


Рис. 4. Потоки CO₂ из почв за отдельные месяцы по результатам моделирования с использование модели Romul_Hum и сценария опадов LV&HR в сравнении с измеренными величинами.

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования эмиссии CO₂ для серых лесных почв южного Подмосковья свидетельствует об удовлетворительном описании моделью Romul_Hum эмиссионных потоков, связанных с минерализацией растительного опада и ПОВ. Оценки, полученные на основе модели ROMUL, завышают показатели эмиссии, особенно в сценарии LV&BR с максимальными запасами лесной подстилки. Мы

склонны объяснять это используемым в алгоритме ROMUL описанием биохимической трансформации лесных подстилок, в котором недооцениваются процессы гумификации, характерные для исследуемого типа почв. Включение в модель Romul_Hum дополнительного описания эффектов, связанных с жизнедеятельностью почвенной фауны, проявляется в увеличении доли устойчивых фракций ПОВ, что оказывается важным при моделировании динамики ПОВ, особенно в

Таблица 3. Средние за 1998–2016 гг. значения годового потока эмиссии CO₂: результаты моделирования в сравнении с величиной потока по данным измерений

Параметр	ROMUL			Romul_Hum			По данным измерений
	LV&BR	LV	LV&HR	LV&BR	LV	LV&HR	
Суммарный поток эмиссии CO ₂ из почвы, кг С/м ² в год	В модели не рассчитывается						0.577
Оценки потока эмиссии CO ₂ (гетеротрофное дыхание), кг С/м ² в год	0.577	0.521	0.541	0.433	0.398	0.414	0.404*
Отношение к оценке гетеротрофного дыхания, рассчитанного на основе данных измерений*, %	142.9	129.0	133.8	107.1	98.4	102.4	100.0

* Рассчитано по данным полевых измерений при допущении, что на долю гетеротрофного дыхания приходится 70% суммарного потока эмиссии CO₂ из почв, а вклад дыхания корней составляет 30% [10]. Выделены значения модельных оценок, максимально близкие к расчетной величине гетеротрофного дыхания, основанной на данных полевых измерений.

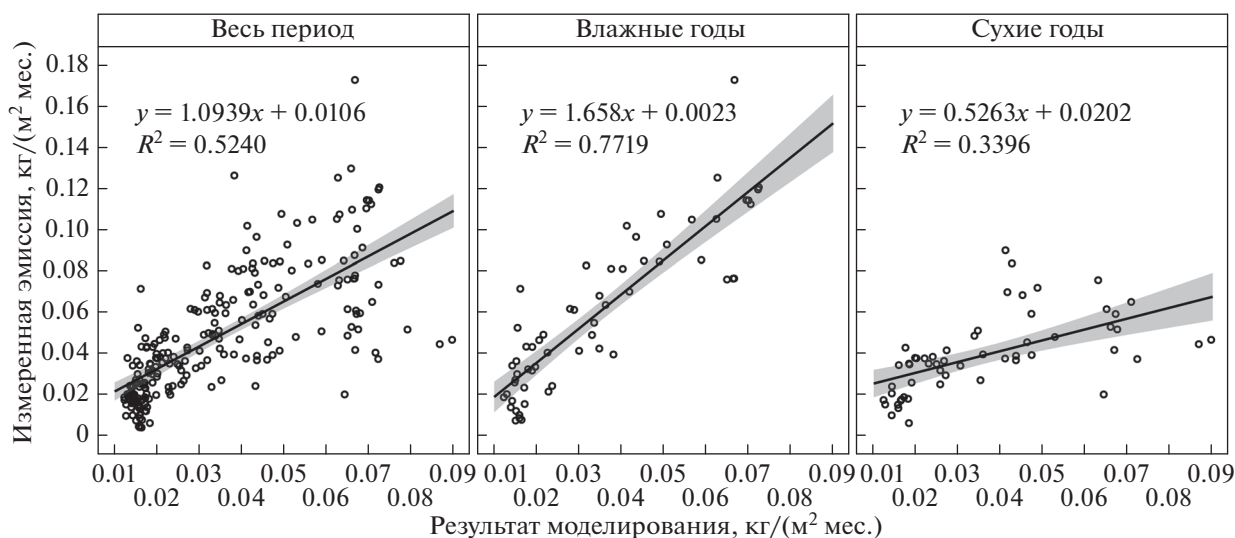


Рис. 5. Сопоставление результатов моделирования эмиссии CO_2 экспериментальным данным (приведены результаты модели Romul_Num для всего периода мониторинговых исследований (1998–2016 гг.) и для выборок сухих и влажных лет; сценарий опадов LV&HR).

лиственных типах леса суббореальной и умеренной зоны.

Неопределенности в модельных оценках и данных полевых исследований. Согласно Лиднеру с соавт. [58], неопределенности в имитационных моделях имеют характер каскада. Это объясняется как причинами, связанными с реализацией алгоритмов моделей, так и с невозможностью учесть многие природные процессы, происходящие на микроуровне и/или сильно локализованные в пространстве [71]. Отметим несколько основных причин неопределенности полученных результатов.

Использование сценариев постоянных опадов. Имеющийся 6-летний ряд измерений количества и состава опада древесного яруса существенно короче периода измерений почвенной эмиссии CO_2 . Поэтому в расчетах были использованы средние значения массы опада листвы и ветвей, несмотря на заметное варьирование показателей в разные годы, отраженное в табл. 1.

Отсутствие натуральных данных по опадку корней древостоя и опадку трав. В работе имитировалось равномерное поступление корневого опада в течение года. Но есть данные, что 70–80% тонких корней трав образуются в начале вегетации и гибнут к зимнему сезону [75]. В результате, их минерализация и гумификация проходят активнее за счет более благоприятных гидротермических условий, что могло быть учтено в имитационных оценках при наличии данных по распределению корневых опадков в течение года.

Расчет температуры и влажности почвенных горизонтов по данным СКФМ ПТЗ – еще один фактор неопределенности выполненных имитаци-

онных оценок, хотя в работе [23] было показано соответствие данных температуры воздуха и осадков для СКФМ ПТЗ и г. Пушкино. Однако даже для близко расположенных территорий локальные различия показателей за короткий отрезок времени могут быть существенными, как например, осадки теплого периода года, что проявляется в вариабельности показателей эмиссии CO_2 [13].

Пространственная неоднородность структуры фитоценозов и лесных почв. Влияние фрагментарно распределенного опада ветвей на результирующие средние значения $\text{C} : \text{N}$ лесной подстилки, отмеченное нами в имитационном эксперименте, в меньшей степени проявляется при моделировании динамики ПОВ хвойных лесов с мохово-кустарничковым напочвенным покровом и ферментативным типом подстилок, где фракции опадков различаются по $\text{C} : \text{N}$ не так заметно [16, 21, 26], как в исследуемом фитоценозе. Богатырев с соавт. [2] отмечают, что в лесах с мохово-кустарничковым покровом ферментативное преобразование опада происходит в условиях, когда он располагается между стеблями мхов и кустарничков. В случае исследуемой серой лесной почвы мы получили сопоставимые с измеренными значениями показатели запасов ПОВ и эмиссии CO_2 в сценарии LV&HR в модели Romul_Num, исключив из имитационных расчетов часть органического вещества, аккумулированного в опаде ветвей. Но пространственное распределение этой фракции опада, несомненно, влияет на гетерогенность почвенных условий и пространственное варьирование потоков CO_2 из почв лесных биотопов, наряду с другими факторами [12, 13]. Таким обра-

зом, отмечаемые в литературе [5, 37, 69] неопределенности оценок углеродного баланса в лесных экосистемах, связанные со сложностью учета крупных древесных остатков (сухостоя и валежа), по-видимому, требуют специального анализа и в отношении более мелких фракций древесного опада (веток, коры, шишек).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возрастающий интерес к использованию математических имитационных моделей в почвенных исследованиях повышает актуальность вопроса сопоставимости данных, полученных в лабораторных экспериментах или в полевых условиях, и результатов моделирования. Только часть параметров, включаемых в модели, может быть измерена экспериментальным путем и использована для проверки адекватности модельных расчетов. Примером такого несоответствия является сравнительный анализ оценок почвенной эмиссии CO_2 в данной работе, который мог быть выполнен лишь косвенно – на основе экспериментальных данных о соотношении корневого и гетеротрофного дыхания, что определяется многими факторами, включая трудно учитываемые.

Неожиданным итогом проверки моделей ROMUL и Romul_Hum стали результаты вычислительного эксперимента с использованием фактических данных опадоуловителей, когда оценки запасов углерода и $\text{C} : \text{N}$ в лесной подстилке заметно отличались от характеристик исследуемой серой лесной почвы. Это заставляет обратить внимание на проблему “игнорирования” мелких фракций древесного опада (веток, коры) при отборе образцов лесной подстилки, почвенных образцов и их пробоподготовке к химико-инструментальным исследованиям, что может вести к занижению углеродного пула лесных почв.

Сравнительный анализ результатов имитационных экспериментов по динамике ПОВ и почвенной эмиссии CO_2 в серой лесной почве южного Подмосквья с использованием моделей ROMUL и Romul_Hum показал, что учет эффектов гумификации, связанных с детритными пищевыми цепями почвенной фауны (реализованный в алгоритме Romul_Hum), позволяет получить более реалистичные оценки почвенных пулов углерода, в частности, для лесов суббореальной зоны.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Эта статья – наша дань памяти профессору А.С. Комарову, внесшему совместно с О.Г. Чертовым основной вклад в создание семейства моделей ROMUL. Также мы с благодарностью вспоминаем А.А. Ларионову, чьи экспериментальные исследования по минерализации растительного опада позволили расширить

спектр почвенно-климатический условий применения данных моделей. Выражаем глубокую признательность всем нашим коллегам, на разных этапах участвовавших в создании и параметризации моделей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования по тестированию модели Romul_Hum выполняются в рамках госзадания ФИЦ ПНЦБИ РАН (тема ИФХиБПП РАН № АААА-А18-118013190176-2). Результаты валидации модели ROMUL получены в рамках выполнения проекта Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 20 (подпрограмма № 20.3). Участие проф. О.Г. Чертова в данных исследованиях реализуется в рамках международного сотрудничества ФИЦ ПНЦБИ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатырев Л.Г., Свентицкий И.А., Шарафутдинов Р.Н., Степанов А.Л. Лесные подстилки и диагностика современной направленности гумусообразования в различных природных зонах // Почвоведение. 1998. № 7. С. 864–875.
2. Богатырев Л.Г., Демин В.В., Матышак Г.В., Сапожникова В.А. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение. 2004. № 4. С. 17–29.
3. Быховец С.С. О параметризации влажности лесной подстилки в простой модели водного режима лесных почв // Математическое моделирование в экологии. Мат-лы 3-й Национ. научн. конф. с междунар. участием. Пушкино, 2013. С. 40–41.
4. Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
5. Гитарский М.Л., Замолодчиков Д.Г., Мухин В.А., Грабар В.А., Диярова Д.К., Иващенко А.И. Поток углерода от валежа южно-таежных лесов Валдайской возвышенности // Экология. 2017. № 6. С. 447–453. <https://doi.org/10.7868/S0367059717060063>
6. Гончаров А.А., Тиунов А.В. Трофические цепи в почве // Журн. общей биологии. 2013. Т. 14. № 6. С. 450–462.
7. Громов С.А., Жигачева Е.С., Покровский Д.Д. Оценка сухих выпадений серы и азота из атмосферы в Приокско-Террасном биосферном заповеднике по данным наблюдений станции ЕМЕП // Экологические системы и приборы. 2018. № 2. С. 10–17.
8. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>

9. *Дюшофур Ф.* Новые данные по гумификации в лесных почвах // Почвоведение. 1998. № 7. С. 883–889.
10. *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 субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2010. № 3. С. 349–355.
11. *Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Стулин А.Ф.* Обобщаемость “нового” и “старого” углерода в составе биомассы почвенных микроорганизмов // Микробиология. 2013. Т. 82. № 4. С. 489–501. <https://doi.org/10.7868/S0026365613040034>
12. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Исаев А.С.* Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таежных лесах // Доклады АН. 2017. Т. 475. № 4. С. 473–476. <https://doi.org/10.7868/S0869565217220248>
13. *Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
14. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
15. *Кравченко Л.В., Тригуль Н.С., Швытов И.А.* Математическое моделирование динамики взаимодействующих популяций ризосферных микроорганизмов // Микробиология. 2004. Т. 73. № 2. С. 233–240.
16. *Кузнецов М.А.* Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.
17. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мяхшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н.* Эмиссия CO₂ из почв различных экосистем южнотаежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 6. С. 843–846.
18. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мяхшина Т.Н., Сапронов Д.В., Савин И.Ю., Шорохова Е.В.* Баланс углерода в лесных экосистемах южного Подмоскovie в условиях усиления засушливости климата // Лесоведение. 2016. № 5. С. 332–345.
19. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С.* Климат южного Подмоскovie: современные тренды и оценка экстремальности // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 4. С. 62–78. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-4-66-82>
20. *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.
21. *Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н.* Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества в почвах зонального ряда // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1232–1241. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15100068>
22. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. Кудеяров В.Н. М.: Наука, 2007. 380 с.
23. Моделирование эрозийных процессов на территории малого водосборного бассейна / Отв. ред. А.С. Керженцев, Р. Майснер. М.: Наука, 2006. 224 с.
24. *Надпорожская М.А.* Моделирование трансформации органического вещества растительных остатков в почве. Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2000. 194 с.
25. *Надпорожская М.А., Чертов О.Г., Ковш Н.В.* Сравнительная динамика потерь азота и углерода при трансформации органического вещества в модельных лабораторных опытах // Гумус и почвообразование. Сб. науч. тр. С.-Петербургского гос. аграрного ун-ва. СПб., 2000. С. 15–30.
26. *Надпорожская М.А., Цудлин П., Новак Ф., Быховец С.С., Чертов О.Г., Комаров А.С., Михайлов А.В.* Анализ устойчивости органического вещества почв ельников Крконоши в Чехии на основе математической модели ROMUL // Почвоведение. 2009. № 6. С. 708–718.
27. *Николаев Н.С., Аблеева В.А.* Характеристика климатических показателей территории Приокско-Террасного заповедника за период наблюдений 1973–2014 гг. // Тр. Приокско-Террасного заповедника. Тула: Аквариус, 2015. Вып. 6. С. 11–23.
28. *Ремезов Н.П., Быкова Л.Н., Смирнова К.М.* Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 284 с.
29. *Рыжова И.М.* Проблемы и перспективы моделирования динамики органического вещества почв // Агрохимия. 2011. № 12. С. 71–80.
30. *Сапронов Д.В.* Динамика поступления углерода в почву с опадом // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Мат-лы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 303–305.
31. Свидетельство о государственной программы для ЭВМ № 2018614584 от 10.04.2018. ROMUL – модель динамики органического вещества и азота в почвах / Комаров А.С., Зубкова Е.В., Зудин С.Л., Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Быховец С.С.
32. *Свистов П.Ф., Першина Н.А., Полищук А.И., Павлова М.Т., Семенец Е.С.* Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011–2015 гг. (Обзор данных). СПб., 2016. 116 с.
33. *Телеснина В.М., Семенов О.В., Богатырев Л.Г.* Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с напочвенным покровом в лесных экосистемах Подмоскovie (на примере УОПЭЦ “Чашниково”) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2017. № 4. С. 11–20.
34. *Чертов О.Г.* Имитационная модель минерализации и гумификации лесного опада и подстилки // Журн. общей биол. 1986. Т. 46. № 6. С. 794–804.

35. *Чертов О.Г., Комаров А.С.* Модель динамики органического вещества почв // Вестн. СПбУ. Ср. 3 Биол. № 1. 1996. С. 23–30.
36. *Чертов О.Г., Комаров А.С.* Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. 2013. № 8. С. 937–946.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13080017>
37. *Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
38. *Шеин Е.В.* Математические физически обоснованные модели в почвоведении: история развития, современное состояние, проблемы и перспективы (Аналитический обзор) // Почвоведение. 2015. № 7. С. 816–823.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15070096>
39. *Blagodatsky S., Richter O.* Microbial growth in soil and nitrogen turnover: A theoretical model considering the activity state of microorganisms // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30(13). P. 1743–1755.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00028-5)
40. *Chertov O.G., Komarov A.S.* SOMM: a model of soil organic matter dynamics // Ecological Modelling. 1997. V. 94. P. 177–189.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)00017-8)
41. *Chertov O.G., Komarov A.S., Crocker G., Grace P., Klir J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.* Simulating trends of soil organic carbon in seven long-term experiments using the SOMM model of the humus types // Geoderma. 1997. V. 81. P. 121–135.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00085-2)
42. *Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.V.* A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in European boreal zone // Forest Ecol. Managem. 1999. V. 116. P. 189–206.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00456-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00456-3)
43. *Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.V.* Simulation of soil organic matter and nitrogen accumulation in Scots pine plantations on bare parent material using forest combined model EFIMOD // Plant and Soil. 1999b. V. 213. P. 31–41.
<https://doi.org/10.1023/A:1004528910399>
44. *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 modelling // Ecological Modelling. 2001. V. 138. P. 289–308.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9)
45. *Chertov O., Komarov A., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M., Shaw C.* Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 125–139.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024>
46. *Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Kalinina O., Pripulina I., Zubkova E.* Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 140–149.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013>
47. *Ding Y., Leppälammil-Kujansuu J., Helmisaari H.-S.* Fine root longevity and below- and aboveground litter production in a boreal *Betula pendula* forest // Forest Ecol. Managem. 2019. V. 431. P. 17–25.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.039>
48. *Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G.* Boreal forest health and global change // Science. 2015. V. 349. № 6250. P. 819–822.
49. *Gordon W.S., Jackson R.B.* Nutrient concentrations in fine roots // Ecology. 2000. V. 81(1). P. 275–280.
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[0275:NCIFR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[0275:NCIFR]2.0.CO;2)
50. *Green R.N., Trowbridge R.L., Klinka K.* Towards a taxonomic classification of humus forms: third approximation // Scientia Silvic. 1997. Extension Series 9.
51. *Homann P.S., McKane R.B., Sollins P.* Belowground processes in forest-ecosystem biogeochemical simulation models // Forest Ecol. Managem. 2000. V. 138. P. 3–18.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00408-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00408-4)
52. *Kahle H.-P., Karjalainen T., Schuck A., Ågren G., Kellomäki S., Mellert K., Prietzel J., Rehfuess K.E., Spiecker H.* Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project. EFI Res. Rep. 21. Brill, Leiden, Boston. 2008. 261 p.
53. *Kalinina O., Chertov O., Frolov P., Goryachkin S., Kuner P., Küper J., Lopes de Gerenyu V., Kurganova I., Lyuri D., Rusakov A., Kuzyakov Y., Giani L.* Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia // Catena. 2018. V. 171. P. 602–612.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.004>
54. *Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E.* Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 113–124.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
55. *Lamers M., Ingwersen J., Streck T.* Modelling N₂O emission from a forest upland soil: A procedure for an automatic calibration of the biogeochemical model Forest-DNDC // Ecological Modelling. 2007. V. 205. P. 52–58.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.007>
56. *Larionova A.A., Yermolayev A.M., Blagodatsky S.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Orlinsky D.B.* Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use // Biol. Fertil. Soils. 1998. V. 27. P. 251–257.
<https://doi.org/10.1007/s003740050429>
57. *Larionova A.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Yermolayev A.M., Kurganova I.N., Blagodatsky S.A.* Land-use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia’s South Taiga zone // Tellus B:

- Chem. Phys. Meteorology. 2003. V. 55(2). P. 331–337.
<https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16718>
58. *Lindner M., Fitzgerald J.B., Zimmermann N.E., Reyer C., Delzon S., van der Maaten E., Schelhaas M.-J., Lasch P., Eggers J., van der Maaten-Theunissen M., Suckow F., Psomas A., Poulter B., Hanewinkel M.* Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? // *J. Environ. Managem.* 2014. V. 146. P. 69–83.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
59. *Linkosalo T., Kolari P., Pumpanen J.* New decomposition rate functions based on volumetric soil water content for the ROMUL soil organic matter dynamics model // *Ecological Modelling.* 2013. V. 263. P. 109–118.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.026>
60. *Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievänen R.* Carbon and decomposition model Yasso for forest soils // *Ecological Modelling.* 2005. V. 189. P. 168–182.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005>
61. *Manzoni S., Porporato A.* Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales // *Soil Biol. Biochem.* 2009. V. 41. P. 1355–1379.
<https://doi.org/10.1016/j.soilb.2009.02.031>
62. *Mulder C., Ahrestani F.S., Bahn M., Bohan D.A., Bonkowski M., Griffiths B.S., Guicharnaud R.A., Kattge J., Krogh P.H., Lavorel S., Lewis O.T., Mancinelli G., Naeemk S., Peñuelas J., Poorter H., Reich P.B., Rossi L., Rusch G.M., Sardans J., Wright I.J.* Connecting the Green and Brown Worlds: Allometric and stoichiometric predictability of above- and below-ground networks // *Adv. Ecol. Res.* 2013. V. 49. P. 69–175.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420002-9.00002-0>
63. *Nadporozhskaya M.A., Mohren G.M.J., Chertov O.G., Komarov A.S., Mikhailov A.V.* Soil organic matter dynamics at primary and second forest succession on sandy soils in The Netherlands: an application of soil organic matter model ROMUL // *Ecological Modelling.* 2006. V. 190. P. 399–418.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.025>
64. *Panikov N.S., Sizova M.V.* A kinetic method for estimating the biomass of microbial functional groups in soil // *J. Microbiol. Methods.* 1996. V. 24. P. 219–230.
[https://doi.org/10.1016/0167-7012\(95\)00074-7](https://doi.org/10.1016/0167-7012(95)00074-7)
65. *Parton W.J., Del Grosso S.J., Plante A.F., Adair E.C., Luz S.M.* Modeling the dynamics of soil organic matter and nutrient cycling // *Soil microbiology, ecology and biochemistry* / Ed. E.A. Paul. London, UK: Academic Press, 2015. P. 505–537.
66. *Ryzhova I.M.* The analysis of stability and bifurcation of carbon turnover in soil-vegetation systems on the basis of the nonlinear model // *Systems Analysis Modelling Simulation.* 1993. V. 12. P. 139–145.
67. *Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I.* Estimating generalized soil water characteristics from texture // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1986. V. 50. № 4. P. 1031–1036.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>
68. *Shaffer M.J., Ma L., Hansen S.* (eds.) Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management. Lewis Publ., 2001. 672 p.
69. *Shorokhova E., Kapitsa E.* Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests // *Forest Ecol. Managem.* 2014. V. 315. P. 173–184.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.025>
70. *Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill W.B., Arsh J.R.M., Chertov O.G. et al.* A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments // *Geoderma.* 1997. V. 81. P. 153–225.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00087-6)
71. *Smith J.U., Smith P., Monaghan R., MacDonald J.* When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? // *Eur. J. Soil Sci.* 2002. V. 53. P. 405–416.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00458.x>
72. *Smith P., Soussana J.-F., Angers D., Schipper L., Chenu C., Rasse D.P., Batjes N.H. et al.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal // *Global Change Biology.* 2020. V. 26(1). P. 219–241.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
73. *Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen, H., Zechmeister-Boltenstern S., Li C.S., Aber J.* A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils. 2. Sensitivity analysis and validation // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105(D4). P. 4385–4398.
<https://doi.org/10.1029/1999JD900948>
74. *Svirezhev Y.M., Tarko A.M.* The global role of the biosphere in the stabilization of atmospheric CO₂ and temperature // *Carbon Cycle Modelling.* Ed. Bolin B. John Wiley & Sons, 1981. P. 355–364.
75. *Sun K., McCormack M.L., Li L., Ma Z., Guo D.* Fast-cycling unit of root turnover in perennial herbaceous plants in a cold temperate ecosystem // *Sci. Reps.* 2015. V. 6. P. 19698.
<https://doi.org/10.1038/srep19698>
76. *Wallman P., Svensson M., Sverdrup H., Belyazid S.* ForSAFE – an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments // *Forest Ecol. Managem.* 2005. V. 207. P. 19–36.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.016>
77. WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
78. *Zelenev V.V., van Bruggen A.H.C., Semenov A.M.* “BACWAVE”, a spatial–temporal model for traveling waves of bacterial populations in response to a moving carbon source in soil // *Microbial Ecology.* 2000. V. 40. P. 260–272.
<https://doi.org/10.1007/s002480000029>

Application of Mathematical Models ROMUL and Romul_Hum for Estimating CO₂ Emissions and Dynamics of Organic Matter in Albic Luvisol under Deciduous Forest in Southern Moscow Region

I. V. Pripulina^{1,*}, S. S. Bykhovets¹, P. V. Frolov¹, O. G. Chertov², I. N. Kurganova¹,
V. O. Lopes de Gerenyu¹, D. V. Sapronov¹, and T. N. Mjakshina¹

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

²*Bingen Technical University of Applied Sciences, Bingen, 55411 Germany*

*e-mail: pripulina@pbcras.ru

The study was aimed to validate the ROMUL and Romul_Hum simulation models based on the long-term measurements of soil respiration carried out by the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Sciences of the Russian Academy of Sciences in southern Moscow region (54°50' N 37°34' E). We estimated the dynamics of carbon stocks and soil CO₂ emissions (microbial soil respiration) for three scenarios of plant litter compiled with due account for experimental data on the composition and mass of litter for gray forest soil (Albic Luvisol) under secondary deciduous forest. The calculations of long-term series of temperature and humidity of forest litter and upper organomineral horizons in simulation experiments are based on the real data on air temperature and precipitation for 1973–2016. The best agreement of simulation results with the data of field measurements showed the Romul_Hum model, which implements a description of the effects associated with the vital activity of the soil fauna leading to the formation of different fractions of soil organic matter. The best correspondence of simulated values of CO₂ emissions, carbon stocks, and C: N ratios in gray forest soil horizons to field data demonstrated the litter scenarios that excluded the input of a fraction of small branches. It was an unforeseen result. The revealed differences between the simulated and real values of soil indicators are explained by the peculiarities of the input and transformation of different fractions of the litter, which is not always taken into account during the soil sampling. The results of the study call the attention to the need to analyze the uncertainty of carbon balance estimates in forest ecosystems due to the complexity of accounting for both large wood residues (dead tree and coarse wood debris) and smaller fractions of wood litter.

Keywords: forest soils, simulation models, organic matter, litter fractions, soil biota, mineralization, CO₂ emission