

=====МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ=====  
===== «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ»=====

УДК: 574.45:581.524.442:630\*43

## Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке

©2012 Комаров А.С.<sup>\*</sup>, Хораськина Ю.С.<sup>\*\*</sup>, Быховец С.С.,  
Безрукова М.Г., Чертов О.Г.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Московская обл., 142290, Россия

**Аннотация.** В работе представлено описание модели динамики органического вещества почв и основанной на ней модели динамики кальция в почве. Рассматриваются различные подходы к моделированию почвенных процессов. Работа модели динамики кальция рассмотрена на примере дубового леса в условиях Московской области при двух сценариях развития. Показано, что более подвижные формы кальция сильнее реагируют на внешние воздействия (рубки), однако степень и направление реакции может зависеть от типа леса и запасов гумуса в почве.

**Ключевые слова:** моделирование динамики органического вещества, круговорот кальция, нарушения лесных экосистем, последствия рубок.

### ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимические циклы биофильных элементов являются ключевыми для понимания эволюции и современного состояния биосферы [1,2]. Разомкнутость циклов приводит к изменениям условий местообитаний и, в свою очередь, к изменению структуры растительности [3,4], обеспечивая основную обратную связь, управляющую сопряженной динамикой растительности и почвы. Современный анализ этих проблем в последние десятилетия проводится методами математического моделирования. При этом выяснилось, что наименее разработанным является количественное описание динамики органического вещества почвы (ОрВП) и соответствующей динамики элементов питания растений: азота, кальция, магния и других элементов.

Со времени опубликования первой обзорно-сравнительной статьи П. Смита с соавторами [5], в которой было проведено сравнение девяти существовавших на тот момент моделей динамики ОрВП, к настоящему времени при интенсивных дискуссиях начали оформляться основные направления в моделировании динамики ОрВП, которые можно классифицировать следующим образом.

А. Аналитические модели, использующие балансовые уравнения физической химии по отношению к динамике углерода, азота и других элементов (FORSAFE и др.). Эти модели показывают хорошие результаты в описании ионного обмена и почвенной кислотности в рамках проблемы критических нагрузок [6].

---

\* as\_komarov@rambler.ru

\*\* yulia\_hor@rambler.ru

- Б. Аналитические модели, использующие методы физики (Q-модель [7], например). В них используются методы, типичные для теоретической физики и дающие хорошие результаты для динамики углерода в региональном и глобальном масштабах.
- В. Модели, базирующиеся на статистической обработке серий экспериментальных данных и с использованием компьютерных методов обработки для зависимостей коэффициентов (CENTURY [8], LPJ [9], YASSO [10], RothC [11] и др.). В таких моделях ОрВП представлено как смесь различных органических составляющих: лигнина, гемицеллюлозы и т. д. Его химический состав зависит от типа растительности. Компоненты трансформируются друг в друга и в углекислый газ в зависимости от температуры, влажности почвы, рН, содержания лигнина и т. д.
- Г. Модели, использующие основные уравнения (балансовые или дифференциальные), основанные на известных процессах и серии предположений о взаимосвязях между ведущими переменными. Этот подход основан на обобщенном описании динамики ОрВП без деления ее на компоненты, но при этом принимаются во внимание последовательные трансформации ОрВП почвенными обитателями, активность которых зависит от элементов питания (ROMUL [12]; ICBM [13]). Они имеют общую схему для количественного описания, что позволяет рассчитывать затем коэффициенты, которые могут быть иногда и нелинейными функциями, включая прямое воздействие динамики микроорганизмов и почвенных животных на динамику ОрВП и элементов питания.

В этой работе мы продолжим развивать подход, на основе которого была построена цепочка моделей динамики ОрВП в лесной подстилке [14,12] и расширим последнюю версию этой модели ROMUL на верхние горизонты минеральной почвы, а также на основе базовой модели динамики ОрВП построим модель динамики кальция в лесной подстилке и минеральной почве.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Основной последовательностью процессов деструкции (минерализации) и гумификации (синтеза высокомолекулярных органических молекул в почве) органического вещества почвы в модели ROMUL [12] является привязка преобразований органического вещества почвы к смене стадий деструкции, маркируемых различными группами биоты и соответствующими типами гумуса (мор, модер, мулль). Приведем краткое описание модели (рис. 1).

Согласно этим предположениям мы выделяем пулы органического вещества, до некоторой степени соответствующие морфологическим горизонтам почвенного профиля, в предположении, что почвенные горизонты маркируются специфическими процессами, так же как и типами гумуса.

В модели пулы свежего опада растительности делятся по фракциям соответственно по органам деревьев и видовой принадлежности, отличаются содержанием азота и зольности, и могут быть взяты как из экспериментальных данных, так и моделей древостоев [15] или глобальных моделей [16]. Модель имеет параллельные связанные потоки вещества, один для органического вещества и другие для элементов минерального питания, в первую очередь, азота. Зольность, содержание азота в опаде, температура и влажность почвы определяют в модели скорости разложения на различных его этапах.

Рассмотрим основные переменные базовой модели.

$L_{above}$  – пул органического вещества, соответствующий верхнему слою лесной подстилки  $L$ , содержит морфологически неразложившийся опад. Основная группа трансформаторов – микроорганизмы и грибы. Скорость трансформации в следующий пул –  $k_{L_{above}}$ .

$L_{below}$  – пул органического вещества, содержащий неразложившийся и полуразложившийся корневой опад, находящийся в подстилке и/или минеральной почве. Скорость трансформации в следующий пул –  $k_{L_{below}}$ .

Часть углерода пулов при разложении покидает систему в виде углекислого газа (скорости этих процессов помечены  $R_i$  на схеме).

$F$  – пул органического вещества, содержащий частично разложившийся опад, в котором остались различные фрагменты органов растений, пропитанные гумусовыми веществами, что соответствует ферментированному горизонту  $F$  подстилки. Трансформация происходит несколькими путями. Группа микроорганизмов, грибов и микроартропод со скоростью  $k_F$  переводит часть этого пула в пул  $H$  лесной подстилки, часть в органическое вещество минерального горизонта ( $Sh$ ),  $d$  – коэффициент, определяющий соотношение между этими потоками. Образующийся по этому пути органический горизонт относится к грубогумусному типу («мор» с  $C/N = 25...40$ ). Другой путь – трансформация (гумификация), осуществляемая группой дождевых червей и других крупных беспозвоночных, переводящая его в органическое вещество минеральной почвы  $Sh$  определяется как гумус типа «муль» с  $C/N 8...15$ .  $k_{Ef}$  – скорость этого пути трансформации. При сочетании поверхностной аккумуляции с формированием А1 формируется переходный тип гумуса «модер».

$H$  – пул органического вещества, соответствующий нижнему разложившемуся горизонту подстилки  $H$  (гумифицированному).

$Lh$  – пул, который можно условно назвать «подземной подстилкой» или лабильным гумусом, трансформируется двумя путями, как и пул  $F$ , разными группами деструкторов.  $k_{Lh}$  – скорость трансформации микроорганизмами и микроартроподами,  $k_{Ef}$  – скорость трансформации дождевыми червями. Разница с поверхностным опадом заключается в том, что все процессы происходят при другой температуре и влажности.

$Sh$  – стабильный гумус, соответствует органическому веществу верхнего минерального горизонта почвы А1 (Ah). Более глубокие горизонты почвы, также как и подзолообразование, в этой версии модели не рассматриваются.

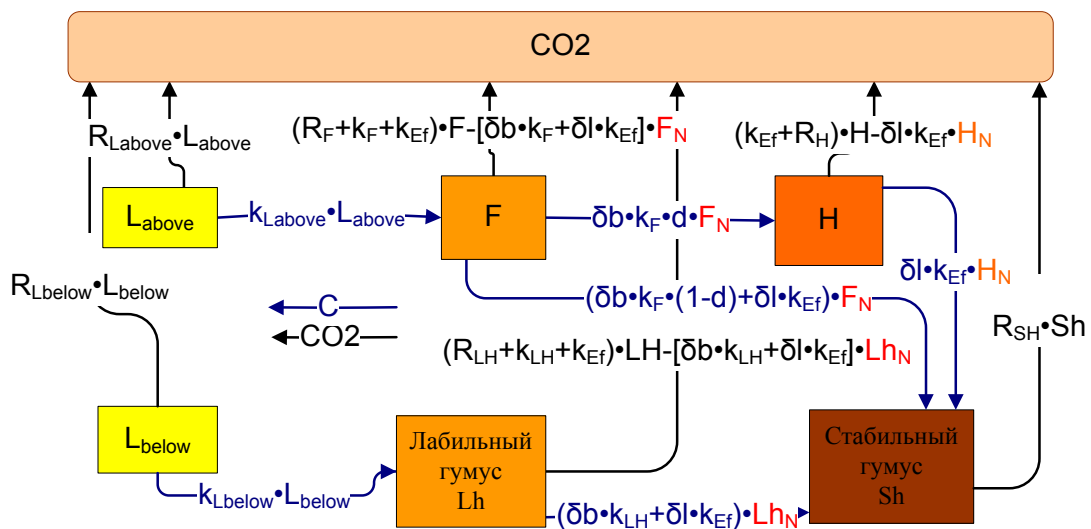


Рис. 1. Схема модели ROMUL, объяснения в тексте.

Пул стабильного гумуса  $Sh$  также разлагается, но с более медленной скоростью, зависящей от температуры и влажности почвы. Скорость составляет от 1–2% до 15% в год, в зависимости от почвенной текстуры и содержания глины. Максимальная скорость разложения наблюдается для пахотных почв. С другой стороны, почти половина ОрВП в бореальной зоне содержится в пуле  $H$ , и значение скорости  $k_{Ef}$  оказывает большое влияние на общий запас ОрВП в почве.

$F_N, F_H, LH_N$  – пулы азота в соответствующих пулах органического вещества.

Коэффициенты  $R_{Labove}, R_{Lbelow}, R_F, R_H, R_{SH}, R_{LH}$  – скорости перехода углерода из соответствующих пулов органического вещества в углекислый газ, который покидает систему.

$\delta b, \delta l$  – дополнительные коэффициенты, описанные ранее [12] как пропорция массы органического вещества, трансформируемая почвенной фауной в гумус.

Размерности  $L, F$  и  $H, Lh, Sh$  – кг/кв.м,  $R_i, k_i$  – день<sup>-1</sup>. Значения коэффициентов зависят от температуры и влажности почвы (или лесной подстилки) в зависимости от того, куда приходит фракция опада (листья или корни). Коэффициенты  $R_{La}, R_{Lb}, R_F, k_{La}$ , будучи связанными с фракциями свежего опада, зависят от содержания в них азота и их зольности.

Мы привели простую схему, позволяющую имитировать не только динамику ОрВП, но и динамику других элементов питания растений в почве. Добавляя некоторые предположения, мы можем связать модель динамики кальция с моделью ROMUL через динамику пулов ОрВП и схожие потоки вещества между ними, но при этом необходимо добавить еще несколько пулов. Это требуется для компенсации того, что продукты трансформации углерода покидают почвенный профиль в виде углекислого газа, не создавая дополнительных пулов, в то время как кальций создает относительно лабильные вторичные минералы, которые могут трансформироваться в другие формы – водорастворимый или обменный кальций. Мы предполагаем, что скорость разложения и трансформации кальция в органическом веществе схожа со скоростями трансформации основных пулов органического вещества в модели ROMUL.

Поэтому в модели кальция мы будем придерживаться той же схемы динамических процессов, что и в модели ROMUL, с некоторыми дополнениями (рис. 2).

$CaL_{above}$  – пул кальция в свежем и неразложившемся опаде, содержится в верхнем подгоризонте подстилки.

$CaL_{below}$  – пул кальция в свежем и неразложившемся корневом (подземном) опаде, содержится в минеральных горизонтах почвы.

$CaF$  – пул кальция в подгоризонте полуразложившихся и разложившихся растительных остатков. Здесь же сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов.

$CaH$  – пул кальция в гумусовом подгоризонте лесной подстилки, содержащем грубый гумус.

$CaSh$  – пул кальция в ОрВП минерального горизонта, содержащем стабильный гумус, связанный с минеральными частицами, этот горизонт формируется с участием дождевых червей.

$CaLh$  – пул кальция в лабильном гумусе.

Пулы  $CaL_{above}$  и  $CaL_{below}$  делятся на фракции соответственно фракциям поступающего опада – хвоя, ветви, древесина, кора, толстые и тонкие корни. В пуле  $CaF$  эти фракции объединяются соответственно в один пул. В  $CaH$  и  $CaSh$  кальций включается в состав органо-минеральных комплексов, образуя фульваты (растворимые) и гуматы (слаборастворимые) кальция.

Трансформация кальция и его потоки между пулами  $CaL_{above}, CaL_{below}, CaF, CaH, CaSh, CaLh$  соответствуют таковым между пулами  $L_{above}, L_{below}, F, H, Sh, Lh$  в модели ROMUL.

Существует еще несколько «внегоризонтных» пулов, отсутствующих в модели ROMUL: легко доступный для растений (и микроорганизмов) пул – водорастворимый кальций почвенного раствора – представляет пулы  $CaAv_{ff}$  и  $CaAv_{ms}$  для подстилки и минеральных горизонтов, соответственно, менее доступный – обменный кальций – пулы  $CaEx_{ff}$  и  $CaEx_{ms}$ , для подстилки и минеральных горизонтов, соответственно.

$Sm$  – пул вторичных минералов кальция – оксалатов кальция (вевелитов и веделитов). Эти минералы растворимы и образуются в подстилке при недостатке

влаги или поступают с опадом, образуясь в клетках растений. В процессе разложения опада и подстилки часть высвободившегося кальция осаждается в виде оксалатов в  $Sm$ . Остальная часть поступает в пул  $CaAv_{ff}$ . Ca копится в этих пулах. Весной, при достижении порогового значения суммы эффективных температур происходит растворение части ( $Sm_{Av}$ ) вторичных минералов и кальций из  $Sm$  поступает в  $CaAv_{ff}$ . Из растворимой формы происходит потребление растениями кальция на протяжении вегетационного периода. Если после потребления в конце вегетационного периода в пулах  $CaAv_{ff}$  и  $CaAv_{ms}$  что-то осталось, то эта часть переходит в пулы обменного кальция –  $CaEx_{ff}$  и  $CaEx_{ms}$ . Если растениям не хватило кальция, то они добывают необходимый Ca из пулов  $CaEx_{ff}$  и  $CaEx_{ms}$  и  $Sm$ .

Размерности перечисленных выше пулов кальция – кг/кв.м.

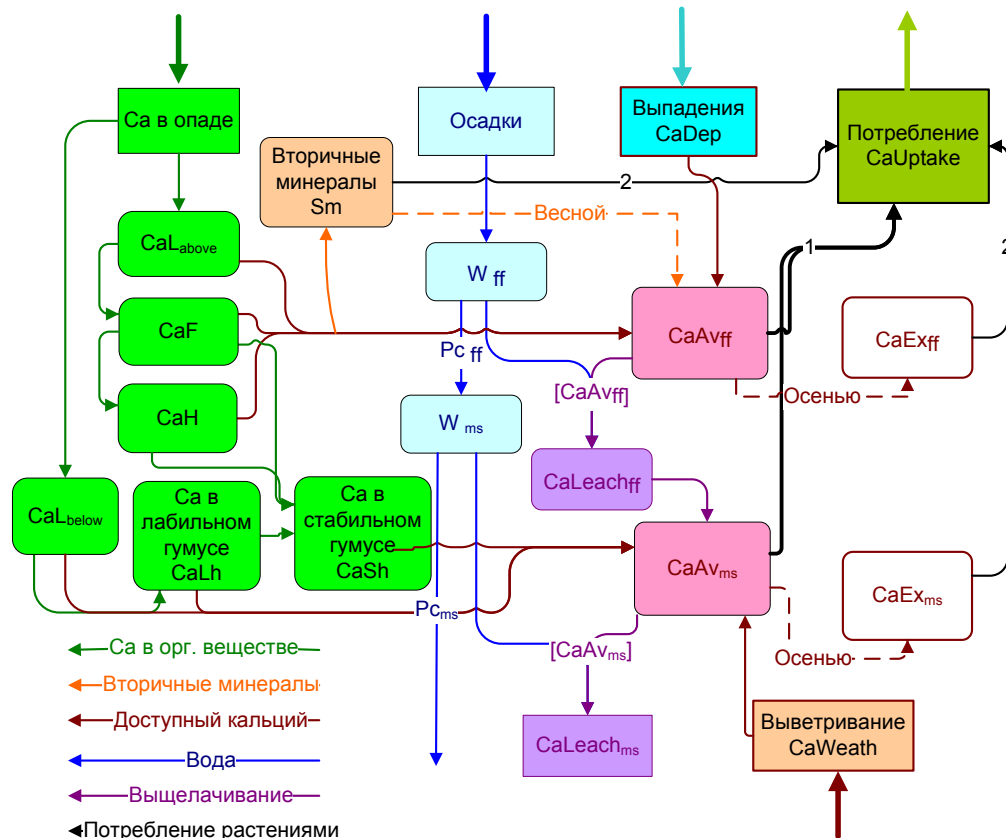


Рис. 2. Схема пулов и потоков в модели динамики кальция. Объяснения в тексте.

$CaUptake$  – поток потребления кальция растениями. Соответствует необходимому количеству кальция для годового прироста растений.

$CaDep$  – поток кальция, поступающего с твердыми и жидкими атмосферными выпадениями. Мы предполагаем, что этот кальций сразу поступает в доступный пул.

$CaWeath$  – поток ежегодного поступления кальция в доступный пул в результате выветривания минералов. Является входным параметром.

$CaLeach_{ff}$  и  $CaLeach_{ms}$  – кальций, который выщелачивается из подстилки в минеральные горизонты и из минеральных горизонтов за почвенный профиль. Рассчитывается в соответствии с объемами протекающей воды эквивалентно концентрациям кальция в  $CaAv_{ff}$  и  $CaAv_{ms}$ .

Размерности перечисленных выше потоков кальция – кг/кв.м./ед. времени.

$Pc_{ff}$  и  $Pc_{ms}$ , л/кв.м./день – поток воды вытекающий из подстилки в минеральную почву и из минеральной почвы за пределы почвенного профиля.  $W_{ff}$  и  $W_{ms}$ , л/кв.м. – запас воды в подстилке и в минеральной почве.

В модели используется дневной шаг по времени, при отсутствии дневных данных о температуре и влажности почвы, могут использоваться климатические сценарии с месячным шагом.

Ниже приведены основные уравнения модели.

$$\begin{aligned} \frac{dCaL_{above}}{dt} &= CaLitterfall_{above} - (k_1 + k_3) \cdot CaL_{above} \\ \frac{dCaL_{below}}{dt} &= CaLitterfall_{below} - (k_1 + k_3) \cdot CaL_{below} \\ \frac{dCaF}{dt} &= k_3 \cdot CaL_{above} - k_2 \cdot CaF - k_4 \cdot CaF - k_5 \cdot CaF \\ \frac{dCaH}{dt} &= d \cdot k_4 \cdot CaF - (k_6 + k_5) \cdot CaH \\ \frac{dCaLh}{dt} &= k_3 \cdot CaL_{below} - (k_2 + k_4 + k_5) \cdot CaLh \\ \frac{dCaSh}{dt} &= ((1-d) \cdot k_4 + k_5) \cdot CaF + (k_4 + k_5) \cdot CaLh - k_8 \cdot CaSh \end{aligned}$$

$k_1, k_2, k_6, k_8$  – коэффициенты, описывающие скорость перехода кальция из пулов  $CaL$ ,  $CaF$  и  $CaLh$ ,  $CaH$ ,  $CaSh$  в пулы доступного (водорастворимого) кальция –  $CaAv_{ff}$  и  $CaAv_{ms}$ .  $k_3$  – скорость трансформации кальция между пулами  $CaL_{above}$  и  $CaF$ ,  $CaL_{below}$  и  $CaLh$ .  $k_4$  – скорость трансформации кальция микроорганизмами и микроартроподами между пулами  $CaF$  и  $CaH$ , между  $CaF$  и  $CaSh$ , между  $CaLh$  и  $CaSh$ .  $k_5$  – скорость трансформации кальция дождевыми червями между пулами  $CaF$  и  $CaSh$ , между  $CaLh$  и  $CaSh$ . Размерности перечисленных выше коэффициентов  $k_i$  – день<sup>-1</sup>.

Для оценки коэффициентов модели мы используем экспериментальные данные, полученные для лесных экосистем, имеющих стационарную динамику. Для оценки коэффициентов этой системы мы принимаем значения, вычисленные для стационарной динамики пулов органического вещества в модели ROMUL.

$CaUp$  – дневное потребление Са растениями во время вегетационного периода, вычисляется как годовое потребление, деленное на продолжительность вегетационного периода.

Если  $(CaAv_{ff} + CaAv_{ms}) > CaUp$ , то:

$$\begin{aligned} \frac{dCaAv_{ff}}{dt} &= (1 - SmL) \cdot k_1 \cdot CaL_{above} + (1 - SmF) \cdot k_2 \cdot CaF + (1 - SmH) \cdot k_6 \cdot CaH + \\ &+ CaDep - \left[ \frac{CaAv_{ff} \cdot CaUp}{(CaAv_{ff} + CaAv_{ms})} \right]^* - CaLeach_{ff} + [SmAv \cdot Sm]^{**} \\ \frac{dCaAv_{ms}}{dt} &= k_1 \cdot CaL_{below} + k_2 \cdot CaLh + k_8 \cdot CaSh + CaWeath + CaLeach_{ff} - \\ &- \left[ \frac{CaAv_{ms} \cdot CaUp}{(CaAv_{ff} + CaAv_{ms})} \right]^* - CaLeach_{ms} \\ \frac{dCaEx_{ff}}{dt} &= [CaAv_{ff}]^{***} \\ \frac{dCaEx_{ms}}{dt} &= [CaAv_{ms}]^{***} \end{aligned}$$

$$\frac{dSm}{dt} = SmL \cdot k_1 \cdot CaL_{above} + SmF \cdot k_2 \cdot CaF + SmH \cdot k_6 \cdot CaH - [SmAv \cdot Sm]^{**}.$$

Если  $(CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + CaEx_{ff} + CaEx_{ms} + SM) > CaUp$ , то:

$$\frac{dCaAv_{ff}}{dt} = (1 - SmL) \cdot k_1 \cdot CaL_{above} + (1 - SmF) \cdot k_2 \cdot CaF + (1 - SmH) \cdot k_6 \cdot CaH +$$

$$+ CaDep - \left[ \frac{CaAv_{ff} \cdot CaUp}{CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + Sm + CaEx_{ff} + CaEx_{ms}} \right]^* - CaLeach_{ff} + [SmAv \cdot Sm]^{**}$$

$$\frac{dCaAv_{ms}}{dt} = k_1 \cdot CaL_{below} + k_2 \cdot CaLh + k_8 \cdot CaSh + CaWeath + CaLeach_{ff} -$$

$$- \left[ \frac{CaAv_{ms} \cdot CaUp}{CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + Sm + CaEx_{ff} + CaEx_{ms}} \right]^* - CaLeach_{ms}$$

$$\frac{dCaEx_{ff}}{dt} = \left[ \frac{CaUp \cdot CaEx_{ff}}{CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + Sm + CaEx_{ff} + CaEx_{ms}} \right]^* + [CaAv_{ff}]^{***}$$

$$\frac{dCaEx_{ms}}{dt} = \left[ \frac{CaUp \cdot CaEx_{ms}}{(CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + Sm + CaEx_{ff} + CaEx_{ms})} \right]^* + [CaAv_{ms}]^{***}$$

$$\frac{dSm}{dt} = SmL \cdot k_1 \cdot CaL_{above} + SmF \cdot k_2 \cdot CaF + SmH \cdot k_6 \cdot CaH - [SmAv \cdot Sm]^{**} -$$

$$- \left[ \frac{CaUp \cdot Sm}{(CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + Sm + CaEx_{ff} + CaEx_{ms})} \right]^*,$$

где  $[ ]^*$  – в течение вегетационного периода,

$[ ]^{**}$  – в начале вегетационного периода,

$[ ]^{***}$  – в конце вегетационного периода.

Если  $(CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + CaEx_{ff} + CaEx_{ms} + SM) \leq CaUp$ , то:

$$CaAv_{ff} = 0; CaAv_{ms} = 0; SM = 0; CaEx_{ff} = 0; CaEx_{ms} = 0$$

$$CaUp = CaAv_{ff} + CaAv_{ms} + CaEx_{ff} + CaEx_{ms} + SM$$

$$CaLeach_{ff} = Pc_{ff} \cdot \frac{CaAv_{ff}}{W_{ff}}$$

$$CaLeach_{ms} = Pc_{ms} \cdot \frac{CaAv_{ms}}{W_{ms}},$$

где приведенные переменные соответствуют приведенным выше и на рис. 2.

Температура и влажность почвы, необходимые для оценки скоростей трансформации ОрВП и азота в модели ROMUL, рассчитывались с помощью модели SCLISS [17] с месячным шагом. При этом эвапотранспирация определялась суммарным запасом влаги в почве, включая подстилку; влажность подстилки оценивалась на основе эмпирических связей с влажностью нижележащей почвы, а водный баланс подстилки в явном виде не рассчитывался. При описании динамики кальция возникла потребность в более корректной оценке потока воды через нижнюю границу

подстилки, т. е. в моделировании водного баланса подстилки как таковой. Это, на наш взгляд, можно было сделать достаточно корректно, только перейдя на суточный шаг по времени.

В новой версии подмодели водного режима последовательно рассчитываются запасы влаги в подстилке  $W_{FF}$  и минеральной почве  $W_{MS}$ , описываемые уравнениями:

$$\frac{dW_{FF}}{dt} = P - E_{FF} - Pc_{FF},$$

$$\frac{dW_{MS}}{dt} = Pc_{FF} - E_{MS} - Pc_{MS},$$

где  $P$  – поступление влаги (атмосферных осадков) за единицу времени (сутки),  $Pc_{FF}$  и  $Pc_{MS}$  – потоки влаги через нижние границы подстилки и нижележащего слоя минеральной почвы,  $E_{FF}$  и  $E_{MS}$  – «вклады» соответствующих слоев в суммарное испарение (эвапотранспирацию).

Указанные потоки рассчитываются исходя из следующих допущений:

– Расход влаги на эвапотранспирацию «делится» между подстилкой и минеральной почвой в зависимости от распределения корней по глубине, которое описывается функцией, согласно [18]:

$$R(H) = 1 - B^H,$$

где  $R$  – относительная доля корней данного древесного вида в слое глубиной  $H$ ,  $B$  – параметр, зависящий от вида дерева, типа гумуса и гранулометрического состава почвы.

Таким образом, расход влаги подстилки на эвапотранспирацию принимается равным:

$$E_{FF} = E_0 \cdot E_W(W_{FF}) \cdot (1 - B^{H_{FF}}),$$

а соответствующий расход влаги минеральной почвы –

$$E_{MS} = E_0 \cdot E_W(W_{MS}) \cdot B^{H_{FF}},$$

где  $E_0$  – потенциальная эвапотранспирация,  $H_{FF}$  – мощность подстилки,

$$E_W(W_l) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_l \leq W_{WP,l} \\ \frac{W_l - W_{WP,l}}{W_{FC,l} - W_{WP,l}} & \text{" } W_{WP,l} < W_l < W_{FC,l} \\ 1 & \text{" } W_l \geq W_{FC,l} \end{cases}$$

– функция, описывающая зависимость эвапотранспирации от содержания влаги в почве (подстилке)  $W_l$  и соответствующих значений влажности завядания  $W_{WP,l}$  и наименьшей полевой влагоемкости  $W_{FC,l}$ .

– Поток влаги через нижнюю границу слоя  $l$  (где  $l = FF$  или  $MS$ ) пренебрежимо мал, пока содержание влаги не превышает значения, соответствующего наименьшей полевой влагоемкости  $W_{FC,l}$ , в противном случае он пропорционален величине превышения:

$$Pc_l = \begin{cases} 0 & \text{при } W_l \leq W_{FC,l} \\ a_l \cdot (W_l - W_{FC,l}) & \text{" } W_l > W_{FC,l} \end{cases},$$



$a_i$  – эмпирический коэффициент, оценивавшийся согласно [19]. Оценка остальных параметров и величины  $E_0$  аналогична таковым в старой версии модели.

Описанная система дифференциальных уравнений была аппроксимирована конечными разностями и интегрировалась численно с шагом по времени 1 сутки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера работы модели мы использовали расчеты по двум сценариям для условного средневозрастного широколиственного дубового леса зоны хвойно-широколиственных лесов, с климатическими параметрами г. Серпухова (Московская область). Начальные почвенные данные приведены в таблице 1. В подстилке различали 2 подгоризонта – L и F, т.е. параметр  $d$  был равен 0. Начальное значение водорастворимого кальция равно 0.

**Таблица 1.** Начальные почвенные данные, использованные для вычислительного эксперимента

Название переменной	Органическое вещество	Азот	Кальций
Запас в подстилке, кг/кв.м.	1.5	0.02	0.012
Запас в минеральных горизонтах, кг/кв.м.	15.6	0.78	0.31
Запас обменного кальция в подстилке, кг/кв.м.			0.03
Запас обменного кальция в минеральных горизонтах, кг/кв.м.			1.0

Первый сценарий – стационарное (естественное) развитие в течение 20 лет. Второй сценарий подразумевает изучение влияния сильных нарушений на экосистему, прежде всего на почву – сплошная вырубка леса после 10 лет стационарного развития и 10 лет после сплошной рубки без возобновления леса. При рубке в экосистеме оставалось 20% ветвей и пни, остальное выносилось. Рубка производилась в январе. Так как лес широколиственный, листва опадала до рубки осенью, во время обычного листопада и из системы не выносилась.

Мы видим (рис. 3), что пул кальция в подстилке увеличиваются сразу после рубки по сравнению со стационарным развитием, а затем кальций в этом пуле начинает уменьшаться и через 10 лет практически исчезает. Кальций в гумусе примерно через 5 лет после рубки постепенно начинает снижаться вследствие сильного уменьшения его поступления в подстилку. Для того чтобы его количество упало до нуля, должен пройти очень длительный период времени без возобновления леса на этой территории, количество времени зависит от исходного количества кальция (и гумуса).

Доступный кальций при естественном развитии (рис. 4) имеет высокую сезонную вариабельность, связанную с сезонным ходом разложения органического вещества и потреблением его в вегетационный период, а также межгодовую вариабельность в зависимости от климата. Доступный кальций после рубки имеет схожую динамику с кальцием в подстилке – повышается после рубки (но не так значительно), затем начинает падать. Отсутствие сильно заметного пика после рубки связано, видимо, с увеличением выноса кальция в минеральные горизонты после рубки (рис. 5). Доступный кальций в минеральных горизонтах (рис. 6) сразу после рубки сначала снижается (незначительно), что связано с его выщелачиванием, но примерно через 5 лет начинает превышать тот же показатель для стационарного сценария, что связано как с отсутствием в этот период потребления его деревьями, так и с увеличивающимся поступлением его из гумуса.

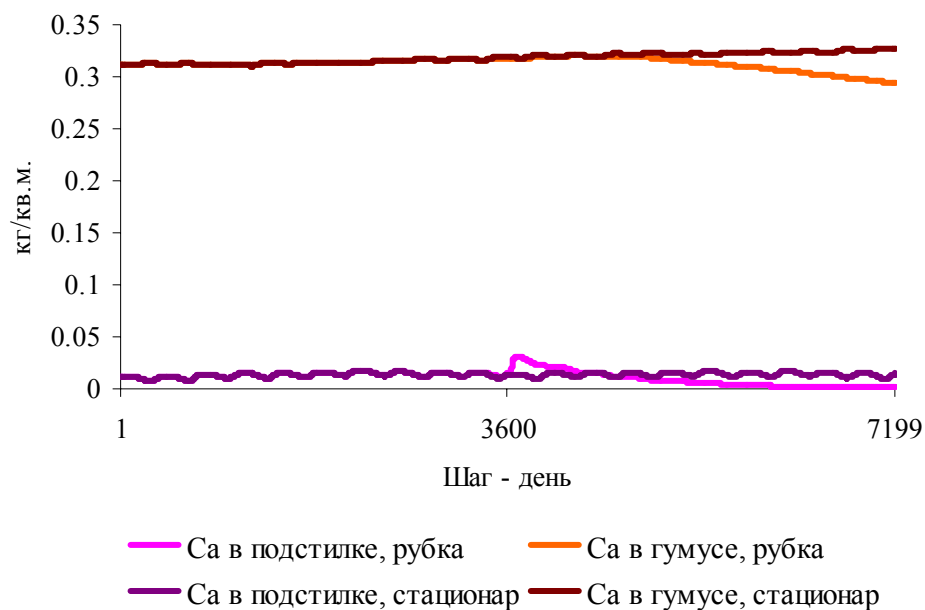


Рис. 3. Динамика кальция в стационарном дубовом лесу и после сплошной рубки.

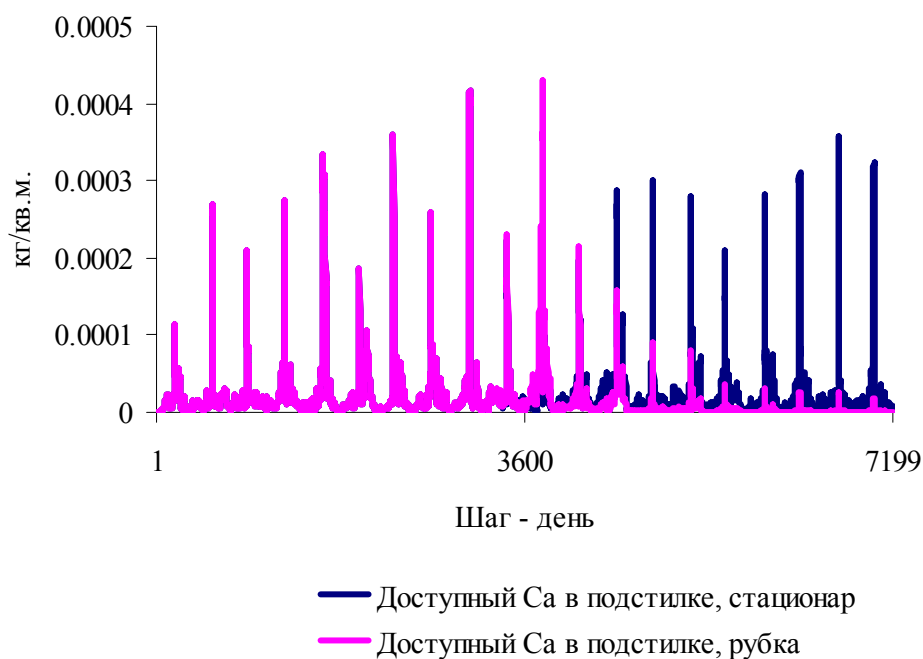
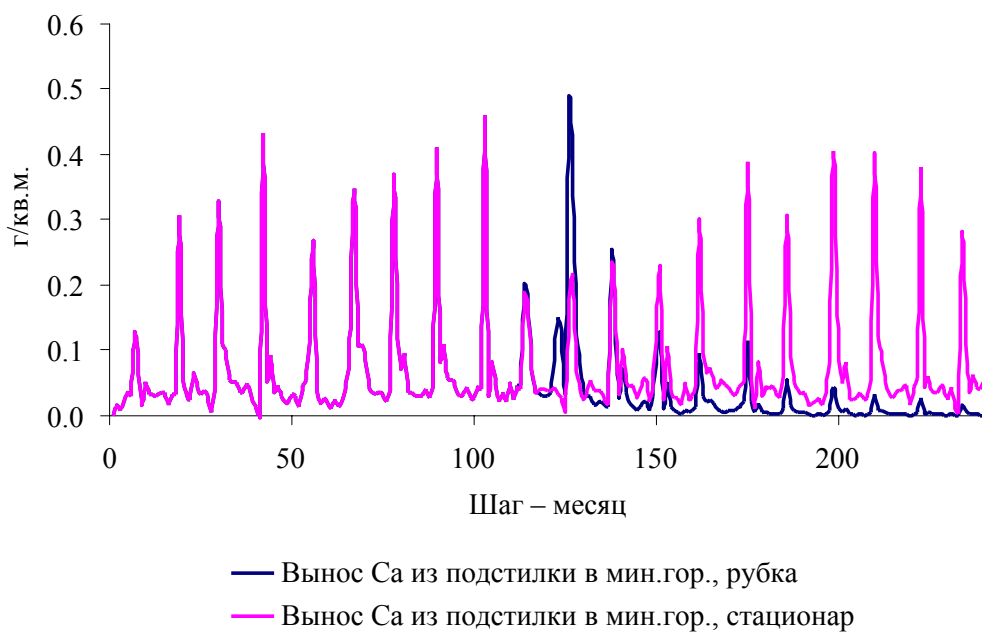
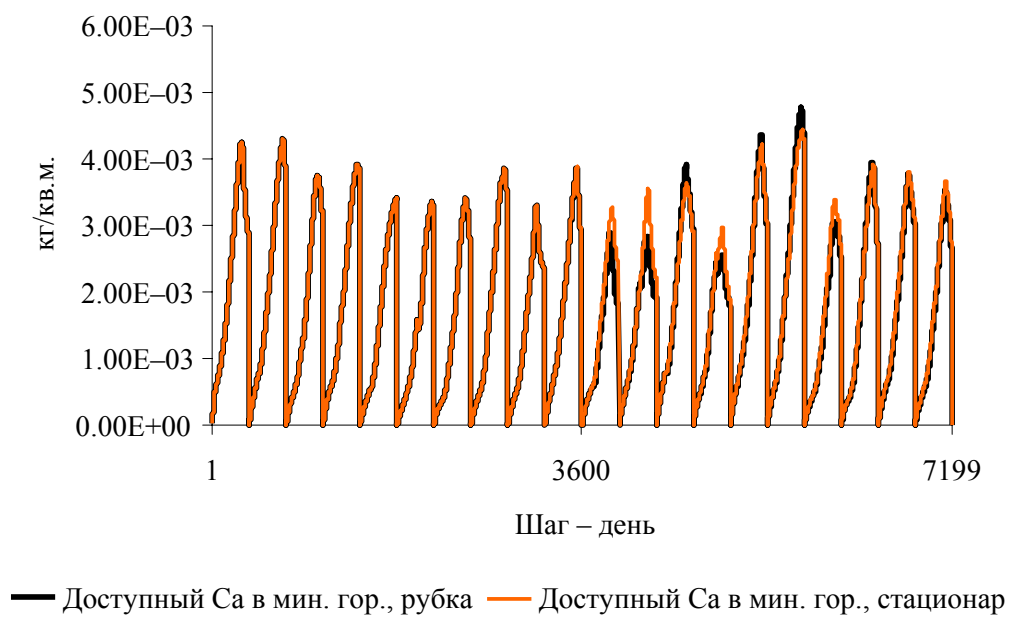


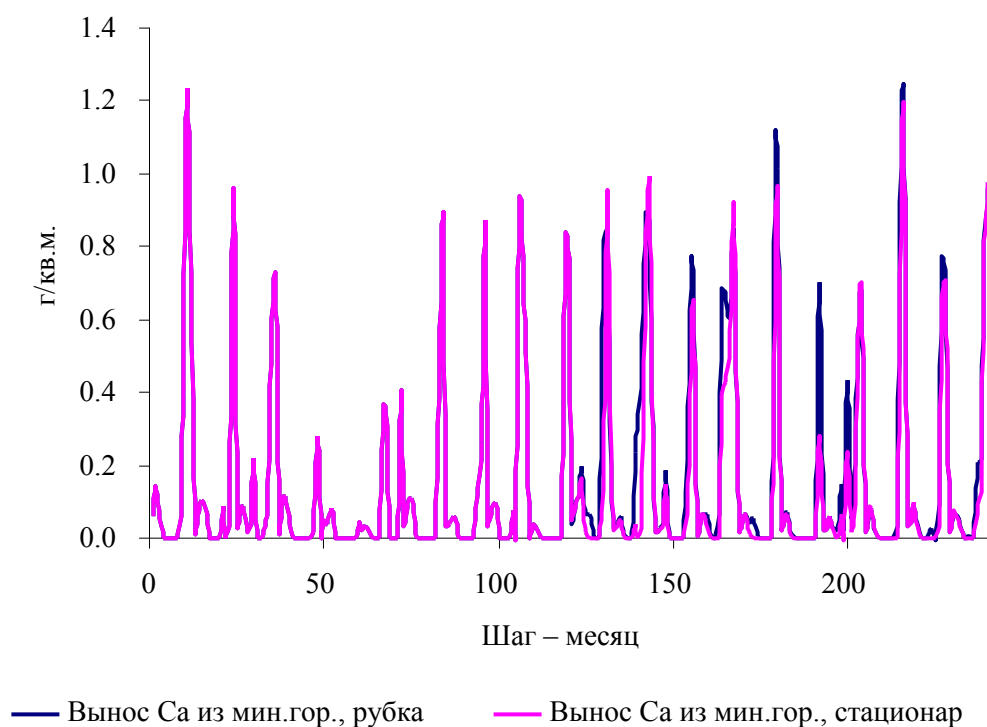
Рис. 4. Динамика доступного кальция в подстилке в стационарном дубовом лесу и после сплошной рубки.



**Рис. 5.** Динамика выщелачивания кальция из подстилки в минеральные горизонты в стационарном дубовом лесу и после сплошной рубки.



**Рис. 6.** Динамика доступного кальция в минеральных горизонтах почвы в стационарном дубовом лесу и после сплошной рубки.



**Рис. 7.** Динамика выщелачивания кальция из минеральных горизонтов в стационарном дубовом лесу и после сплошной рубки.

Вынос кальция из подстилки в нижележащие горизонты (рис. 5) имеет схожую динамику с динамикой доступного кальция в подстилке, т. е. после рубки увеличивается его вынос из подстилки, а потом постепенно вынос уменьшается вместе с уменьшением запасов кальция в самой подстилке. Следует напомнить, что кальций, выносимый из подстилки, согласно схеме модели, поступает в доступный кальций минеральных горизонтов, но, несмотря на это, в минеральных горизонтах сразу после рубки происходит уменьшение количества кальция, а его вынос из минеральных горизонтов увеличивается (рис. 7).

Реакция пулов обменного кальция на рубку не значительная, так как согласно схеме модели, это достаточно устойчивый пул. Происходит незначительное (по сравнению с самими запасами в этом пуле) снижение обменного кальция в подстилке.

Таким образом, можно отметить, что наиболее сильная реакция на рубки наблюдается в различных пулах кальция подстилки, менее выраженная реакция в пулах минерального горизонта, более подвижные формы кальция – доступный (водорастворимый) кальций показывает более сильную реакцию, в то время как связанные формы (обменный кальций) практически не реагируют. Следует отметить, что гумус играет определенную стабилизирующую роль, так как переход органического вещества из подстилки (которая довольно быстро исчезает после рубки) в гумус задерживает кальций в этом пуле и уменьшает выщелачивание. По-видимому, реакция на рубки почв со слабо выраженным гумусовым горизонтом и значительной подстилкой, будет иная (например, елового леса на подзолистой почве). В нашем сценарии мы не производили посадку нового леса, при которой вынос кальция будет сильно снижен за счет перехвата растительностью. Но если посадка будет произведена поздно, то кальция на рост нового поколения может и не хватить, особенно если обменный пул будет мал [20].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Мы видим преимущества предложенного подхода в следующем:

– В терминах выделенных пулов органического вещества и их преобразования в модели ROMUL возможно моделирование динамики пулов элементов минерального питания (азота, кальция и других), причем специфика динамики пулов элементов может быть описана поправками и функциями к коэффициентам общей модели динамики органического вещества. Такие поправки были найдены для азота [12] и кальция [21]. Специфика динамики пулов элементов заключается также во включении в основную модель различных промежуточных пулов в зависимости от элементов (для кальция – пулы вторичных минералов, водорастворимого и обменного кальция), что делает общую схему модели более или менее универсальной.

– Можно использовать для расчетов детальное описание опада различных частей разных видов деревьев, кустарников или трав и т. д. Это будет более реалистичное описание, чем использование только функциональных групп растений [22]. Например, в функциональных группах ель и сосна обычно иницируются одинаково, в то время как они занимают разное экологическое и сукцессионное положение в развитии лесных экосистем, и имеют значительные различия круговорота углерода и других элементов. Тем не менее, их часто связывают в одну функциональную группу.

– Начальные значения ведущих переменных могут быть получены из традиционных почвенных описаний. Пул лабильного гумуса может быть оценен на основе массы толстых и тонких корней и микробной биомассы.

– Коэффициенты модели (скорости минерализации и гумификации различных пулов ОрВП) могут быть оценены из известных лабораторных экспериментов или баз данных экспериментальных исследований (CIDET, LIDET и др.) включая различные компьютерные методы статистического анализа, такие как метод марковских цепей Монте–Карло, Байесовская калибровка и др. [23].

Предыдущая версия ROMULa была калибрована для различного применения в России, Канаде, Германии и странах Восточной Европы. Предлагаемая версия является следующей версией с уточнением выделения пулов органического вещества при сохранении общего подхода и структуры модели. Она показывает реалистичные результаты и может применяться при моделировании влияния на почвы изменения климата, выпадений азота, различного типа рубок и пожаров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в терминах принятой нами общей системы пулов органического вещества и их преобразования в модели ROMUL возможно моделирование динамики пулов элементов минерального питания (азота, кальция и в перспективе – других). Специфика динамики пулов отдельных элементов может быть описана модификациями коэффициентов общей модели динамики органического вещества и/или добавлением новых пулов с соответствующими функциями, описывающими динамику пулов и их преобразований.

Важным методическим приемом, примененным при калибровке модели, является использование экспериментальных данных для стационарного состояния леса для корректировки параметров базовой модели ROMUL для описания динамики пулов кальция.

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что наиболее сильная реакция на рубки наблюдается в пулах кальция подстилки, а также в пулах более подвижных форм, в то время как связанные формы практически не реагируют. Это соответствует известным экспериментальным данным и современным представлениям о биотическом круговороте кальция в лесных экосистемах [24].

Работа поддержана Программой Президиума РАН № 4, грантом РФФИ № 09–04–01209.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. *Химическое строение биосферы Земли и ее окружения*. М.: Наука, 1965.
2. Ковда В.А. *Биогеохимические циклы в природе и их нарушения человеком*. М., 1976.
3. Разумовский С.М. *Закономерности динамики биоценозов*. М.: Наука, 1981.
4. Clements F.E. *Plant Succession*. New York, 1916.
5. Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill W.B., Arah J.R.M., Chertov O.G., Coleman K., Franko U., Frolking T., Parton W.J., Thornley J.H.M., Whitmore A.P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*. 1997. V. 81. P. 153–225.
6. Wamelink G.W.W., van Dobben H.F., Berendse F. Vegetation succession as affected by decreasing nitrogen deposition, soil characteristics and site management: A modelling approach. *For. Ecol. and Manag.* 2009. V. 258. P. 1762–1773.
7. Agren G.I., Bosatta E. *Theoretical Ecosystem Ecology. Understanding Element Cycles*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
8. Parton W.J., Scurlock J.M.O., Ojima D.S., McGill W.B., Arah J.R.M., Chertov O.G., Coleman K., Franko U., Frolking T., Parton W.J., Thornley J.H.M., Whitmore A.P. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*. 1993. V. 7. P. 785–809.
9. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J., Levis S., Lucht W., Sykes M., Thonicke K., Venevski S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global Vegetation Model. *Global Change Biology*. 2003. V. 9. P. 161–185.
10. Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievanen R. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecol. Model.* 2005. V. 189. P. 168–182.
11. Falloon P.D., Smith P. Modelling refractory soil organic matter. *Biol. Fertil. Soils*. 2000. V. 30. P. 388–398.
12. 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. *Ecol. Model.* 2001. V. 138. P. 289–308.
13. Andren O., Katterer T. ICBM: the Introductory Carbon Balance Model for exploration of soil carbon balances. *Ecol. Appl.* 1997. V. 7. P. 1226–1236.
14. Чертов О.Г. Имитационная модель минерализации и гумификации лесного опада и подстилки. *Журнал общей биологии*. 1985. Т. 46. № 6. С. 794–804.
15. Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 – the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems. *Ecol. Model.* 2003. V. 170. P. 373–392.
16. Yurova A.Yu., Volodin E.M., Agren G.I., Chertov O.G., Komarov A.S. Effects of variations in simulated changes in soil carbon contents and dynamics on future climate projections. *Global Change Biology*. 2010. doi: 10.1111/j.1365–2486.2009.01992.x
17. Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом. *Почвоведение*. 2002. № 4. С. 443–452.
18. Gale M.R., Grigal D.F. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Can. J. For. Res.* 1987. V. 17. P. 829–834.
19. Arp P.A., Yin X.I. Predicting water fluxes through forests from monthly precipitation and mean monthly air temperature records. *Can. J. For. Res.* 1992. V. 22. P. 864–877.
20. Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Быховец С.С. Моделирование динамики пулов кальция в лесных экосистемах. В: *Материалы Второй конференции «Математическое моделирование в экологии»*. 2011. С. 285–287.

21. Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Лукина Н.В., Орлова М.А. Модель динамики кальция в северотаежных лесных почвах. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1468–1477.
22. Neilson R.P., Pitelka L.F., Solomon A.M., Allen M., Nathan R., Midgley G.F., Fragoso J.M., Lischke H., Thompson K. Forecasting Regional to Global Plant Migration in Response to Climate Change. *BioScience*. 2005. V. 55. P. 749–758.
23. Безрукова М.Г., Быховец С.С., Грабарник П.Я., Ларионова А.А., Надпорожская М.А. Анализ неопределенности параметров модели разложения органического вещества: байесовский подход. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1423–1427.
24. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. *Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах*. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2010.

Материал поступил в редакцию 5.11.2011, опубликован 24.02.2012.