

УДК: 581.5:631.4

Моделирование динамики кальция в органических горизонтах почвы

Ю. С. Хораськина^{1,a}, А. С. Комаров¹, М. Г. Безрукова¹, М. Жиянски²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290, Московская область, Пушкино, ул. Институтская, 2

² Институт леса Болгарской академии наук, «Kl. Ohridski» Blvd., 1756 Sofia, Bulgaria

E-mail: ^ayulia_hor@rambler.ru

Получено 17 марта 2010 г.

В данной работе представлены результаты моделирования круговорота кальция в лесных экосистемах. Кальций является одним из основных элементов минерального питания растений, регулирующим разные метаболические процессы. Его недостаток вызывает нарушения роста тканей растений. Увеличение дефицита кальция в лесных экосистемах появляется вследствие усиления кислотной нагрузки или отчуждения биомассы при вырубках. Модель представляет собой описание круговорота на основе потока вещества между пулами, включая подробное описание почвенной части круговорота – трансформация и минерализация подстилки и др. Для калибровки модели использовались экспериментальные данные по еловым лесам Болгарии.

Ключевые слова: круговорот кальция, математическое моделирование экосистем, вторичные минералы

Modeling of calcium dynamics in soil organic layers

Yu. S. Khoraskina¹, A. S. Komarov¹, M. G. Bezrukova¹, M. Zhiyanski²

¹ Institute of Physico-chemical and Biological Problems in Soil Science RAS, 2 Institutskaya, Pushchino, Moscow region, 142290, Russia

² Forest Institute of Bulgarian Academy of Sciences, "Kl. Ohridski" Blvd., 1756 Sofia, Bulgaria

Abstract. – Calcium is a major nutrient regulating metabolism in a plant. Deficiency of calcium results in a growth decline of plant tissues. Ca may be lost from forest soils due to acidic atmospheric deposition and tree harvesting. Plant-available calcium compounds are in the soil cation exchange complex and soil waters. Model of soil calcium dynamics linking it with the model of soil organic matter dynamics ROMUL in forest ecosystems is developed. ROMUL describes the mineralization and humification of the fraction of fresh litter which is further transformed into complex of partially humified substance (CHS) and then to stable humus (H) in dependence on temperature, soil moisture and chemical composition of the fraction (nitrogen, lignin and ash contents, pH). Rates of decomposition and humification being coefficients in the system of ordinary differential equations are evaluated using laboratory experiments and verified on a set of field experiments. Model of soil calcium dynamics describes calcium flows between pools of soil organic matter. Outputs are plant nutrition, leaching, synthesis of secondary minerals. The model describes transformation and mineralization of forest floor in detail. Experimental data for calibration model was used from spruce forest of Bulgaria.

Keywords: calcium turnover, mathematical modeling of ecosystems, secondary minerals

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 103–110 (Russian).

Работа поддержана программой РАН № 4, грантом РФФИ № 09-04-01209 и программой межкакадемического соглашения БАН и РАН по теме «Математическое моделирование динамики почвенного органического вещества в горных лесных почвах».

© 2010 Юлия Сергеевна Хораськина, Александр Сергеевич Комаров, Мария Геннадьевна Безрукова, Миглена Кирчева Жиянски

1. Введение

Описание динамики растительности при естественном развитии и при восстановлении после внешних воздействий, таких как лесные пожары, рубки и т. п., остается одной из основных проблем в науках о живом [Комаров, 2009]. Узким местом при моделировании биологического круговорота элементов в экосистемах оказывается моделирование динамики элементов минерального питания растений в почве. Почва является сложным трехфазным (твердая, жидкая и газообразная фазы) объектом, пропитанным смесью высокомолекулярных органических соединений. В ней происходят два главных процесса: минерализация органического вещества почвы (ОрВП) (трансформация в низкомолекулярные соединения с выделением парниковых газов: диоксид углерода, оксиды азота, метан и др.) и гумификация (синтез новых высокомолекулярных соединений). При этом в почве могут возникать и минеральные соединения (так называемые вторичные минералы). При этом органические соединения подвергаются трансформации многочисленным почвенным населением, начиная от микроорганизмов и кончая мелкими млекопитающими.

В настоящее время существуют два основных подхода к моделированию ОрВП. В первом случае почва представлена как аддитивная смесь различных органических соединений (лигнин, гемицеллюлозы и т. д.), состав которой зависит от преобладающей растительности. Составляющие этой смеси независимо преобразуются друг в друга и в парниковые газы в зависимости от условий среды, в первую очередь от температуры, влажности и pH (CENTURY [Pastor, Post, 1985], YASSO [Liski et al., 2005]). Второй подход основан на интегральном описании динамики ОрВП без разделения на составляющие, но с учетом активности почвенной биоты, которая зависит от динамики элементов питания, в первую очередь, азота (ROMUL [Chertov, Komarov, 1997; Chertov et al., 2001], ICBM [Andrén, K tterer, 1997]). В этой статье мы на основе модели динамики ОрВП, опубликованной ранее [Chertov, Komarov, 1997] построим и верифицируем модель динамики кальция, который является одним из основных элементов минерального питания растений.

2. Описание модели Romul-Ca

2.1. Базовая модель динамики органического вещества почвы Romul

Основной последовательностью процессов деструкции (минерализации) и гумификации ОрВП в модели ROMUL, описанной ранее [Chertov et al., 2001] является привязка преобразований ОрВП к смене стадий деструкции, маркируемых различными группами биоты и соответствующими типами гумуса (мор, модер, мулль). Приведем краткое описание модели.

Кинетика пулов ОрВП и их преобразований с выделением диоксида углерода в результате процесса минерализации сложных органических соединений может быть описана системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами

$$\begin{aligned} dL/dt &= L_0 - (k_1 + k_3)L, \\ dF/dt &= k_3L - (k_2 + k_4 + k_5)F, \\ dH/dt &= (k_4 + k_5)F - k_6H, \end{aligned}$$

где L_0 – неразложенный опад, L – поступающий на/в почву опад, разлагаемый грибами и микроартроподами (k_1) и трансформирующийся в пул F – полуразложившиеся растительные остатки (k_3). Этот пул соответствует F -горизонту лесной подстилки. k_2 – скорость минерализации пула F . В дальнейшем происходит переработка пула F в результате деятельности бактерий и почвенной мезофауны (k_4) и дождевых червей (k_5) в полностью гумифицированное органическое вещество H . k_6 – скорость минерализации пула H .

Размерности L , F и H – кг/кв. м, k_i – день⁻¹. Значения коэффициентов зависят от температуры и влажности почвы (или лесной подстилки) в зависимости от того, куда приходит фрак-

ция опада (листья или корни). Первые три коэффициента, будучи связанными с фракциями свежего опада, зависят от содержания в них азота и их зольности. Существуют еще зависимости скоростей разложения от содержания лигнина в опаде и pH почвы, но в этой статье мы их не рассматриваем. Все коэффициенты, за исключением k_6 , определены из лабораторных экспериментов и/или литературных данных [Комаров и др., 2007; Chertov et al., 2001]. Коэффициент k_6 , будучи очень малым (процент минерализации гумуса минеральных горизонтов равен всего 1–3 % и не может быть определен из экспериментальных данных), оказывается калибровочным.

Мы предполагаем, что динамика основных элементов почвенного питания соответствует принятым в базовой модели пулам, однако скорости преобразования пулов могут быть другими – с задержкой или ускорением. Тогда задача моделирования динамики кальция сводится к нахождению поправок к коэффициентам k_i , взятым из базовой модели. Используя аналогичные соображения, модель ROMUL была также расширена для описания динамики пулов азота в почве [Chertov et al., 2001]. Это позволило, в частности, на основе усложненной модели построить систему моделей EFIMOD для моделирования процессов роста леса и биологического круговорота углерода и азота [Komarov et al., 2003], которая успешно применялась для моделирования роста леса для смешанных лесов России, Финляндии, Канады и других стран, находящихся в умеренной и бореальной климатических зонах.

Необходимо отметить, что кальций в почве обладает еще некоторыми промежуточными пулами. Недостаточность экспериментальных данных для строгого статистического определения поправок может быть скомпенсирована наличием данных для лесных экосистем, биологический круговорот элементов в которых находится в динамическом равновесии. Тогда предположение о стационарном (steady-state) состоянии системы позволяет упростить процедуру нахождения поправок к коэффициентам базовой модели для других элементов.

Мы использовали для этого измерения, проведенные на стационаре Института леса БАН «Парангалица», находящемся в старом разновозрастном еловом лесу, который можно считать находящимся в стационарном состоянии.

2.2. Romul-Ca

Блок-схема модели динамики основных пулов кальция представлена на рис. 1.

В этой модели мы будем придерживаться той же схемы почвенного профиля, что и в базовой модели ROMUL. Выделяем пулы в следующих почвенных горизонтах и подгоризонтах:

L_{Ca} – пул кальция в свежем и неразложившемся опаде, содержится в верхнем подгоризонте подстилки L;

F_{Ca} – пул кальция в горизонте F. Здесь сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов;

H_{Ca} – пул кальция в гумусовом подгоризонте лесной подстилки;

$A1_{Ca}$ – пул в минеральном горизонте, содержащем гумус, связанный с минеральными частицами, этот горизонт формируется с участием дождевых червей.

В этой статье динамика последнего пула не рассматривается. Для L_{Ca} и F_{Ca} пулы делятся на фракции соответственно фракциям поступающего опада – хвоя, ветви, древесина, кора, толстые и тонкие корни. В пулах H_{Ca} и $A1_{Ca}$ все эти фракции объединяются в один пул.

Существует еще несколько «внегоризонтных» пулов.

Доступный для растений (и микроорганизмов) пул включает в себя кальций почвенного раствора и обменный кальций почвенно-поглощающего комплекса (ППК). Водорастворимый кальций почвенного раствора, легко доступный для растений, представляет пул Ca available (Av), менее доступный обменный кальций – Ca exchangeable (Ex).

Sm – пул вторичных минералов кальция – вевелитов и ведделитов – оксалатов кальция. Эти минералы растворимы и образуются в подстилке при недостатке влаги или поступают с опадом, образуясь в клетках растений. Вследствие малого количества материалов по динамике этих минералов, мы предполагаем следующее, основываясь на известных нам данных

[Cromack et al., 1979]. В динамике кальция будем различать два периода – вегетационный – с начала снеготаяния и до опадения листвы – и период покоя. Различия будут введены для долей от потоков Ca, поступающих в результате минерализации в пул Av, и доли, уходящей во вторичные минералы (Sm_f, Sm_l).

Период покоя. В процессе разложения опада и подстилки часть от высвободившегося кальция осаждается в виде оксалатов. Остальная часть поступает в пул доступного кальция. Са копится в этих пулах. Весной, при достижении почвой положительных температур, что можно считать началом снеготаяния, происходит растворение части (Sm_{Av}) вторичных минералов и растворенный кальций из Sm поступает в Av.

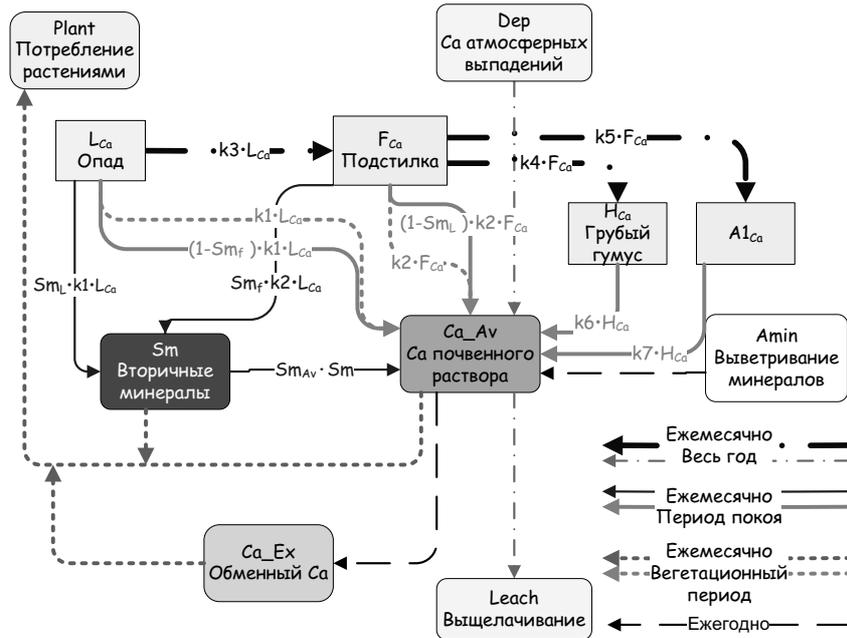


Рис.1. Блок-схема модели динамики кальция

Вегетационный период. Весь кальций, освободившийся в результате минерализации подстилки и опада, поступает в Av, доля, поступающая в Sm, равна 0. Из растворимой формы происходит потребление растениями ежемесячно на протяжении вегетационного периода. При этом возможны следующие варианты. Если после потребления в конце вегетационного периода в пуле Av что-то осталось, то эта часть переходит в обменный Ca – Ex. Если растениям не хватило кальция, то они добирают необходимый Ca из пула Sm (т. е. «растворяют» вторичные минералы с помощью кислых корневых выделений), если не хватило там, то добирают из пула Ex. Потребление происходит с месячным шагом, пополнение пула Ex – раз в год.

Amin – пул ежегодного поступления кальция в доступный пул в результате выветривания минералов. Является входным параметром и может рассчитываться отдельно, если известен минералогический состав, с помощью других моделей, например PROFILE [Sverdrup, 1996].

Plant – пул потребления растениями. Соответствует необходимому количеству кальция для годового прироста растений и определяется по биомассе прироста и концентрации кальция в отдельных органах доминирующих растений.

Dep – пул кальция, поступающего с твердыми и жидкими атмосферными выпадениями. Мы предполагаем, что этот кальций сразу поступает в пул Av.

Leach – кальций, который из пула Av выносятся из почвенного профиля в грунтовые воды.

В течение шага по времени происходят трансформация органического вещества и его минерализация и, соответственно, переход кальция из одного пула в другой. Эти процессы описываются в виде следующих уравнений для одной фракции опада:

$$dL_{Ca} / dt = -R_1 * L_{Ca} - R_3 * L_{Ca}, \tag{1}$$

$$dF_{Ca}/dt = R_3 * L_{Ca} - R_2 * F_{Ca} - R_4 * F_{Ca} - R_5 * F_{Ca},$$

$$dH_{Ca}/dt = R_4 * F_{Ca} - R_6 * H_{Ca},$$

$$dA1_{Ca}/dt = R_5 * F_{Ca} - R_7 * A1_{Ca},$$

$$dA_v/dt = (1 - Sm_i) * R_1 * L_{Ca} + (1 - Sm_f) * R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * A1_{Ca} + Sm_{Av} * Sm + A_{min} + Dep - Plant - Leach,$$

$$dSm/dt = Sm_i * R_1 * L_{Ca} + Sm_f * R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * A1_{Ca} - (Plant - Av),$$

$$dEx/dt = Ex + Av - (Plant - Av - Sm).$$

Коэффициенты в уравнениях системы (1) так же, как и в модели ROMUL, зависят от температурно-влажностных условий и содержания азота и зольности соответствующей фракции опада. R_1 – скорость минерализации пула L_{Ca} . R_3 – скорость трансформации L_{Ca} в F_{Ca} . R_2 и R_4 – соответствующие скорости минерализации и трансформации горизонта F_{Ca} в H_{Ca} . R_5 – скорость трансформации F_{Ca} в $A1_{Ca}$. R_6 – скорость минерализации H_{Ca} . R_7 – скорость минерализации $A1_{Ca}$.

В качестве начальных значений коэффициентов мы принимаем значения, вычисленные для динамики пулов органического вещества в модели ROMUL. Это позволит в дальнейшем найти условия стационарного состояния для динамики пулов органического вещества, а затем определить поправки к соответствующим коэффициентам для пулов кальция, обеспечивающим стационарную динамику этих пулов.

3. Калибрация модели динамики кальция для стационарного состояния в горных еловых лесах Болгарии

Ранее была проведена калибровка модели для северотаежных лесов Европейской части России на примере ельника кустарничково-зеленомошного [Хораскина и др., 2009]. Программная реализация модели динамики кальция выполнена М. Г. Безруковой в среде Borland Developer Studio на языке Object Pascal.

3.1. Объект исследования

Проводилась калибровка модели ROMUL совместно с моделью динамики кальция для еловых горных лесов в заповеднике «Парангалица» (Болгария) в районе юго-западной части Рилы. Среднегодовая температура 4.9°C , годовое количество осадков – 900 мм. Вегетационный период длится 4.5–5 месяцев. На территории заповедника была заложена пробная площадь в разновозрастном еловом насаждении, средний возраст 180–200 лет, диаметр 78–79 см и высота до 55 м. Содержание органического вещества, азота и кальция, используемое в качестве входных данных, приведено в таблице 1. Среднее содержание кальция в опаде хвои ели – 1.7 %, азота – 1 %.

Таблица 1

Содержание органического вещества, азота и кальция, (жирным выделены значения, используемые в качестве входных данных)

Горизонт	Органическое вещество, кг/м ²	Азот, %	Кальций, %	Азот, кг/м ²	Кальций, кг/м ²
L	0.544	0.46	0.35	0.0025	0.00190
F	0.672	0.42	0.18	0.0028	0.00121
H	2.8	0.38	0.13	0.0106	0.00364
Подстилка суммарно	4.016			0.016	0.00675
A	14.7	0.38	0.082	0.56	0.00031

По данным многолетних наблюдений рассматривалась одна когорта опада, средняя за несколько лет, без деления на фракции, имеющая средние свойства по химическому составу, содержание азота в опаде – 1 %, кальция – 1,67 %, зольность – 2.8 %.

3.2. Результаты и обсуждение

3.2.1. Результаты вычислительных экспериментов для стационарного состояния

В предположении стационарного состояния динамики органического вещества в рассматриваемой лесной экосистеме вначале проводился вычислительный эксперимент на 100 лет с помощью базовой модели ROMUL. Вычисленные по предложенным ранее методикам коэффициенты с помощью изменения калибровочного коэффициента k_6 привели к стационарной динамике пулов ОрВП в горизонтах F и H (рис. 2).

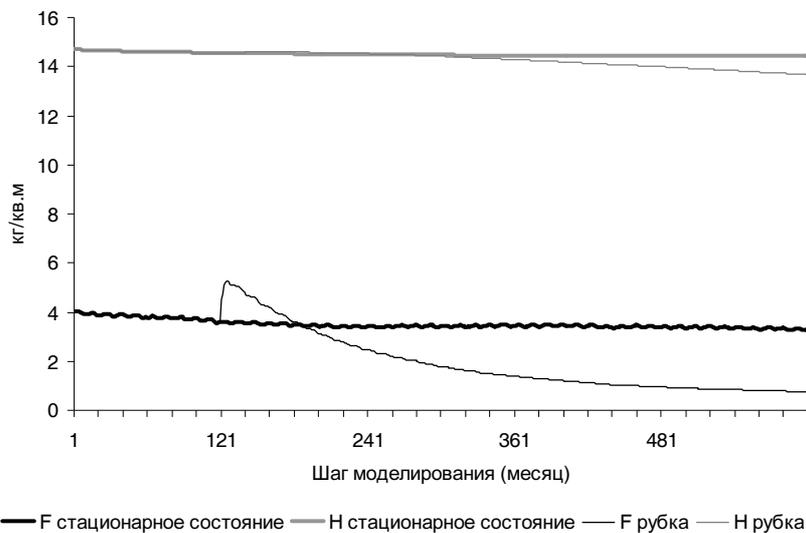


Рис. 2. Динамика пулов органического вещества. Горный ельник. Результаты вычислительных экспериментов

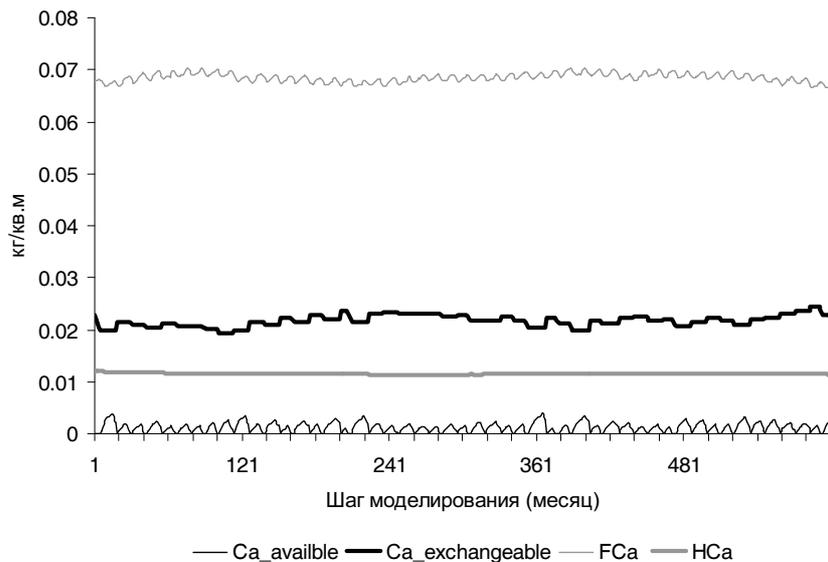


Рис. 3. Динамика пулов кальция. Стационарное состояние. Горный ельник. Результаты вычислительных экспериментов

Затем было проведено моделирование с помощью модели ROMUL-Ca для определения поправок к коэффициентам, обеспечивающим стационарное состояние динамики описанных выше пулов кальция. В качестве начального приближения использовались значения коэффициентов базовой модели. При этом были приняты основные допущения модели динамики кальция – потребление кальция растительностью принималось равным поступлению его с опадом, объемы выпадений из атмосферы и выщелачивания также принимались равными.

В результате численных экспериментов были получены следующие соотношения между коэффициентами R_i системы (1) и коэффициентами k_i модели ROMUL: $R_1 = k_1$; $R_2 = k_2$; $R_3 = k_3$; $R_4 = 0.5k_4$. При этих поправках в результате модельного эксперимента на 100 лет мы получили динамику пулов кальция, близкую к стационарному состоянию.

3.2.2. Результаты вычислительных экспериментов для сценария с катастрофическими нарушениями

Далее проводился вычислительный эксперимент по имитации воздействия катастрофических нарушений на динамику пулов элементов в лесной экосистеме. Сценарий эксперимента: 10 лет стационарного развития леса, затем сплошная рубка с выносом (т. е. отсутствием опада) всех стволов, ветвей и хвои деревьев, корни при этом остаются на участке. Затем на участке растет только напочвенный покров, опад которого принимается равным 20 % от общего опада при стационарном состоянии. Таким образом, мы перевели экосистему леса искусственно в экосистему поляны (или луга). Моделирование проводилось на 50 лет.

Как было показано ранее, рубки приводят к кратковременному накоплению органического вещества в подстилке, гораздо меньше пик для гумуса [Комаров и др., 2007]. На рис. 2 видно, что при рубке также происходит резкий скачок в накоплении органического вещества в пуле F и менее явный в пуле H вследствие поступления большой порции опада корней и его дальнейшего разложения. При этом восстановления прежнего уровня запаса органического вещества не происходит из-за низкого поступления опада. Если вырубка зарастет, то через некоторое время, зависящее от типа нового леса, произойдет восстановление запаса органического вещества в подстилке и гумусе.

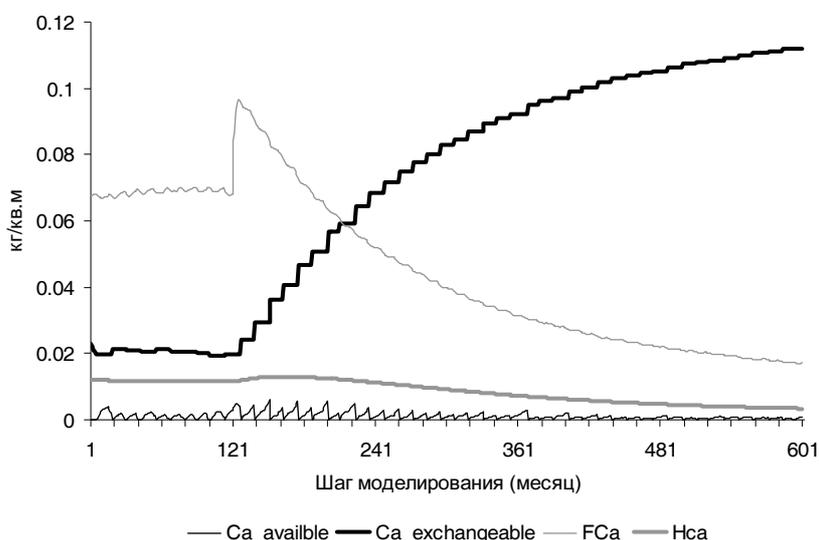


Рис. 4. Динамика пулов кальция. Рубка. Горный ельник. Результаты вычислительных экспериментов

Представляют интерес результаты вычислительного эксперимента для динамики кальция, представленные на рис. 4. Видно, что в подстилке также отмечается пик накопления кальция, но связано это с поступлением одноmomentно большого количества опада. Отмечается плавное увеличение пула обменного кальция вследствие повышенного его поступления в связи с увеличившимся опадом и недостаточного потребления (потребителем остался только напочвенный

покров). Этот добавочный пул кальция может расходоваться на разные статьи: он может вымыться из почвенного профиля, потратиться на новообразование минералов, например оксалатов, может увеличить насыщенность ППК основаниями (т. е. действительно увеличить пул обменного кальция), может образовать органо-минеральные соединения с гумусовыми кислотами и закрепиться в почвенном профиле.

Скорее всего, происходят все эти процессы, но в разных соотношениях. Перераспределение кальция между этими потоками будет зависеть от сложившихся условий – температуры и влажности почвы, количества осадков, наличия запасов гумуса, механического состава почв. Эту задачу мы надеемся решить в дальнейшем.

Таким образом, показано, что построенная модель при естественных предположениях удовлетворительно описывает динамику пулов кальция в лесных почвах, а методика определения коэффициентов при наличии данных для лесных экосистем, находящихся в стационарном состоянии, приводит к простым соотношениям между коэффициентами базовой модели для динамики суммарных пулов органического вещества почвы и динамикой пулов кальция. Наличие поправок объясняется спецификой химизма кальция и его относительной закрепленностью в почвенном профиле. Реакция пулов элементов в лесных почвах на сильные внешние воздействия демонстрирует сильную связь с развитием растительности; при этом лесная экосистема в целом способна ликвидировать последствия таких воздействий за счет выноса возникающего избыточного количества элементов при выщелачивании либо создания пулов хранения, таких как вторичные минералы или малорастворимые соединения кальция с гумусовыми кислотами.

Список литературы

- Andrén O., Kätterer T.* ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances // *Ecological Applications*. 1997. V. 7. Iss. 4. P. 1226–1236.
- 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. Vol. 138. P. 289–308.
- Chertov O.G., Komarov A.S.* SOMM – a model of soil organic matter dynamics // *Ecological Modelling* 1997. V. 94. P. 177–189.
- Cromack K. Jr. R, Sollins Ph., Graustein W. C., Speidel K., Todd A. W., Spycher G., Li Ch.Y., Todd R. L.* Calcium oxalate accumulation and soil weathering in mats of the hypogeous fungus *Hysterangium crassum* // *Soil Biol. Biochem.* 1979. Vol. 11. P. 463–468.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E.* EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems // *Ecological Modelling*. 2003. Vol. 170 (2–3). P. 373–392.
- Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievänen R.* Carbon and decomposition model Yasso for forest soils // *Ecological Modelling*. 2005. Vol. 189 (1–2). P. 168–182.
- Pastor J., Post W. M.* Development of a Linked Forest Productivity Soil Process Model. 1985. Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-9519. 168 pp.
- Sverdrup H.* Geochemistry, the key to understanding environmental chemistry // *The science of the total environment*. 1996. vol. 96. P. 67–87.
- Комаров А. С. и др.* Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007.
- Комаров А. С.* Модели сукцессии растительности и динамики почв при климатических изменениях // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2009. Т. 1. № 4. С. 405–413.
- 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 Российской академии наук*. 2009. №7. С. 1468–1477.