

УДК: 574.45:581.524.442:630\*43

## МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КАЛЬЦИЯ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

© 2009 Ю.С. Хораськина<sup>1</sup>, А.С. Комаров<sup>2</sup>, М.Г. Безрукова<sup>3</sup>, Н.В. Лукина<sup>4</sup>, М.А. Орлова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино; e-mail: yulia\_hor@rambler.ru; <sup>2</sup> as\_komarov@rambler.ru; <sup>3</sup> work.message.system@gmail.com

<sup>4</sup> Учреждение Российской академии наук Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, г. Москва; e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

В данной работе представлены результаты моделирования динамики кальция в почвах северотаежных лесных экосистем. Модель представляет собой описание потоков вещества между пулами, включая подробное описание трансформации и минерализации лесной подстилки. Для калибровки модели использовались экспериментальные данные по северотаежным лесам.

Ключевые слова: круговорот кальция, математическое моделирование экосистем, вторичные минералы, выщелачивание, влияние pH.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что кальций – самый распространенный щелочноземельный элемент в земной коре, встречающийся как в магматических породах – гранитах, так и в метаморфических – базальтах. Благодаря своему ионному радиусу и заряду, Са часто встречается в алюминиево-силикатных минералах, таких как пироксен, амфибол и полевые шпаты, особенно в плагиоклазе. Осадочные породы – известняк, доломит, гипс и фосфориты богаты Са. Благодаря большому количеству, заряду и слабой способности к гидратации ион Са сильнее связывается глинами и гуматами по сравнению с другими катионами металлов. Са относительно легко выветривается как растворенный катион из первичных и вторичных минералов, но скорость выветривания значительно зависит от pH раствора (Likens et al., 1998).

Кальций – жизненно необходимый элемент для прокариот, грибов, растений и животных. Для растений является важным регулятором роста и развития, а также входит в состав ряда ферментов. Концентрация кальция в живых организмах, где он является структурным элементом, довольно высока. Са плохо выщелачивается из живых листьев благодаря относительной иммобилизации в пектатах клеточных стенок и мембранах.

Неорганический кальций почвах присутствует как структурный компонент первичных и вторичных минералов, почвенного поглощающего комплекса (ППК) и как катион почвенного раствора. Благодаря ионному заряду ион Са не так быстро теряется почвами с большой катионно-обменной емкостью, по сравнению с кислыми почвами с высоким содержанием обменного алюминия. В ППК из щелочно-земельных металлов больше всего кальция и поэтому он очень

важен для регуляции кислотности почв.

Кальций поступает в лесные экосистемы с атмосферными выпадениями и в результате выветривания минералов. После освобождения в ходе разложения и минерализации органического вещества ион Са поступает в почвенный раствор, из которого может адсорбироваться в ППК, поглощаться растениями или микроорганизмами или выщелачиваться из почвенного профиля (Likens et al., 1998).

В этой работе мы попытались описать динамику кальция в лесной экосистеме с помощью достаточно простой математической модели. Кальций поглощается растениями из почвенного раствора, в биомассе растений он накапливается, после отмирания растений или их частей переходит в органические остатки (опад), которые затем минерализуются в почве. При этом Са переходит в доступную для растений форму (ионы почвенного раствора и ППК) и вновь поглощается растениями. Часть доступного кальция участвует в образовании новых минералов (оксалаты кальция) или выщелачивается вниз по профилю. Вынос кальция из лесной экосистемы осуществляется за счет внутрпочвенного стока, поверхностного стока и стока с грунтовыми водами, а также при вырубке и отчуждении биомассы за пределы экосистемы.

Биогеохимический круговорот в экосистемах северной тайги обладает следующими особенностями. Растительные остатки в этих условиях разлагаются медленно, растворимые продукты быстро удаляются из почвы с просачивающимися водами. В результате в верхней части почвы накапливается преимущественно грубый кислый гумус, поглощающий комплекс резко ненасыщен Са и Mg. Для тайги характерен азотный тип химизма биологического круговорота ( $N > Ca$ ), в

широколиственных – кальциевый  $Ca > N$ . В холодной тайге разложение органических веществ протекает медленнее, микроорганизмы работают менее энергично, время их деятельности меньше, некоторые группы бактерий отсутствуют. Масса подстилки более чем в 10 раз превышает опад зеленой части, что свидетельствует о заторможенности биогеохимического круговорота (Башкин, 2004).

Известные модели биологического круговорота биофильных элементов в лесных экосистемах обычно включают в себя подробное описание почвенной части круговорота и детально рассматривают химию почвенного раствора на основе уравнений равновесия ионного обмена. При этом описание растительности во всех моделях оказывается слишком упрощенным.

Так, например, модель PROFILE разработана в Швеции, в Университете Лунда, первоначально для решения проблем закисления почв (Sverdrup, 1996.). Модель рассчитывает химию почв в равновесном состоянии, в котором все поступление кислоты в почвенную систему сбалансировано процессами выветривания, потребления азота или выноса кислоты из системы. Эта модель используется для расчета скорости выветривания исходя из геохимических свойств почв, таких как механический и минералогический состав, все входные данные могут быть изменены по почвенным образцам.

PROFILE является статической моделью, она не отвечает на вопрос о скорости подкисления или скорости восстановления почвенного профиля. С этой целью применяется динамическая модель – SAFE. Эти модели являются частью системы моделей ForSAFE, в которую входят также модель DECOMP разложения органического вещества почвы, гидрологическая модель, и модель MAKDEP, описывающая рост леса. Таким образом, если рассматривать комплекс моделей, то можно описать динамику круговорота основных катионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ), которые в модели рассматриваются суммарно (Sverdrup, 1996, Walse, 1998).

Тем же целям отвечает и NuCM – модель, описывающая круговорот элементов минерального питания с дневным, недельным или месячным шагом, разработанная в 1988 коллективом авторов (Johnson et al., 2000) для хвойных и широколиственных лесных экосистем для имитации влияния атмосферных выпадений, вырубки лесов, изменения количества осадков, повышения температуры и уровня  $CO_2$  и известкования почв. Описывает круговорот N, P, K, Ca, Mg и S на уровне насаждения, также включает в себя потоки главных катионов ( $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ),

анионов ( $NO_3^{-2}$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $Cl^{-1}$ ,  $HCO_3^{-}$ , ортофосфат, органические ионы) и кремния в осадках, лизиметрических водах и почвенном растворе. Конструкция модели опирается на химию почв и почвенных растворов. Экосистема представлена в модели в виде ряда растительных и почвенных слоев.

Цель данной работы – разработать модель динамики пулов кальция в лесной почве, для связи динамики пулов кальция с динамикой пулов органического вещества и азота почвы, опираясь при этом на экспериментально определяемое минимальное число уравнений и коэффициентов модели. В соответствии с этой целью можно выделить следующие задачи: 1. учет содержания органического вещества в почвенных горизонтах для возможности определения начальных состояний соответствующих пулов кальция; 2. использование значений скоростей минерализации органического вещества, полученные в модели динамики органического вещества почвы ROMUL (Chertov et al., 2001; 3. описание специфической задержки доступного кальция в форме вторичных минералов в отдельном пуле и поиск условий его включения в общую динамику пулов кальция; 4. при условии, что в северотаежных лесах можно предположить стационарность динамических процессов, провести калибровку коэффициентов, 5. учесть различия между динамикой пулов кальция и динамикой пулов органического углерода и охарактеризовать их поправками к коэффициентам модели ROMUL, как это было ранее сделано для динамики пулов азота.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В нашей модели мы будем придерживаться следующей схемы почвенного профиля для северотаежных экосистем. Мы выделяем в отдельный пул доступный для растений (и микроорганизмов) кальций –  $A_v$ , включая в него кальций почвенного раствора и обменный кальций. Поскольку в модели не будет введена отдельно жидкая фаза – почвенный раствор, то этот пул выступит неким его аналогом. Выделены пулы в следующих почвенных горизонтах и подгоризонтах:

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

$F_{Ca}$  – В этом подгоризонте находятся полуразложившиеся и разложившиеся растительные остатки. Здесь же сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов.

$H_{Ca}$  – пул кальция в гумусовом подгоризонте, содержащем грубый гумус

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

$B$  – пул кальция минерального горизонта (Е-подзолистый), который обеднен кальцием вследствие вымывания.

$C$  – пул кальция в минеральном горизонте, обогащенном кальцием за счет вмывания из вышележащих. В этой статье динамика трех последних пулов 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  $A1_{Ca}$  эти фракции объединяются соответственно в один пул. В  $H_{Ca}$  и  $A1_{Ca}$  кальций включается в состав органо-минеральных комплексов, образуя фульваты (растворимые) и гуматы (слаборастворимые) кальция. Большая часть этих соединений представлена фульватами.

Существует еще несколько «внегоризонтных» пулов.

$Sm$  – пул вторичных минералов кальция – веделитов 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 (Stomask, 1978). В процессе разложения опада и подстилки часть кальция осаждается в виде оксалатов в размере 1/3 от высвободившегося кальция. Остальная часть поступает в доступный пул. В течение года этот кальций накапливается в пуле  $Sm$ . Весной, при достижении почвой положительных температур, что можно считать началом снеготаяния, происходит растворение части вторичных минералов и растворенный кальций из  $Sm$  поступает в  $Av$ . Далее кальций опять накапливается в  $Sm$ .

$Amin$  – пул ежегодного поступления кальция в доступный 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. Изъятие производится один раз в год из пула доступного кальция в тот же месяц, когда происходит

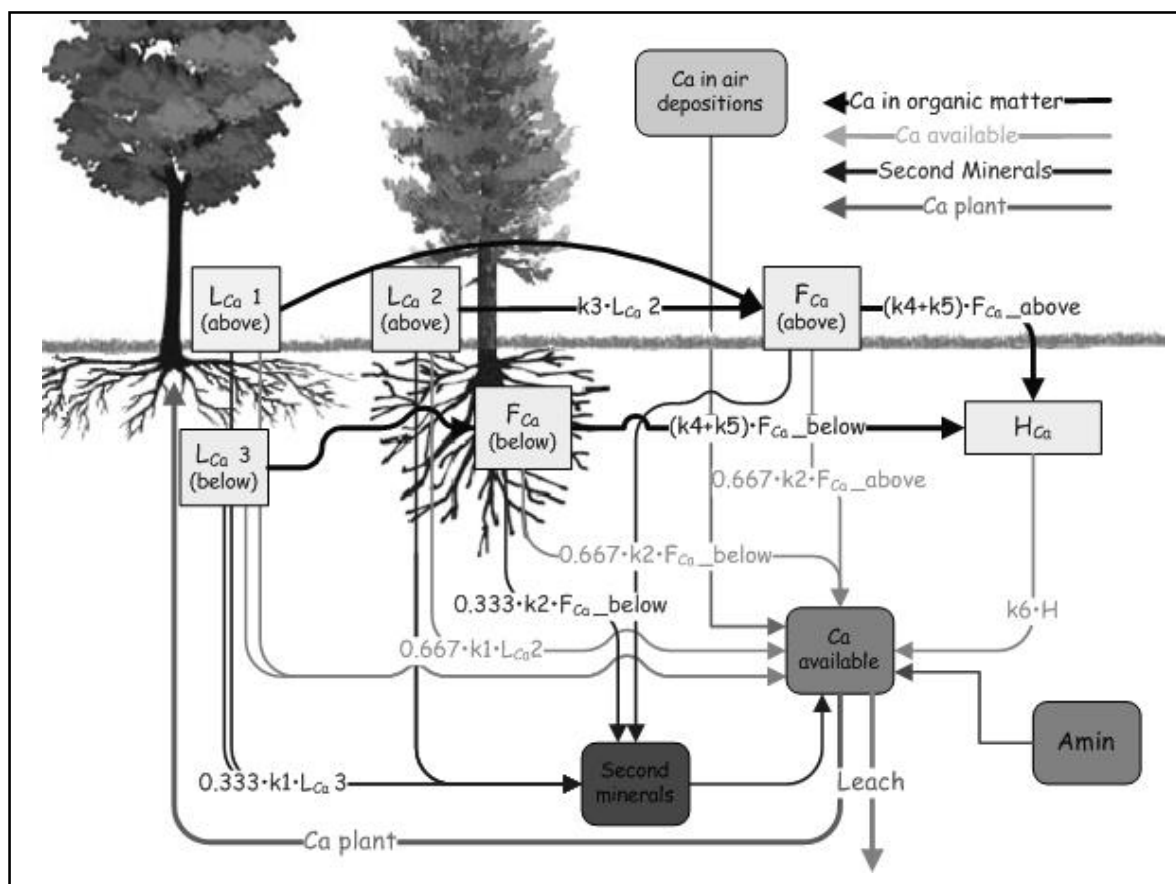


Рис. 1. Схема модели круговорота кальция.

поступление туда кальция вторичных минералов.

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

Leach – кальций, который из доступного пула выносится из почвенного профиля.

Между описанными выше горизонтами происходит 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:

$$\begin{aligned} dL_{Ca}/dt &= -R_1 * L_{Ca} - R_3 * L_{Ca} \\ dF_{Ca}/dt &= R_3 * L_{Ca} - R_2 * F_{Ca} - R_4 * F_{Ca} - R_5 * F_{Ca} \\ dH_{Ca}/dt &= R_4 * F_{Ca} - R_6 * H_{Ca} \\ dA1_{Ca}/dt &= R_5 * F_{Ca} - R_7 * H_{Ca} \\ dA_v/dt &= A_{min} + Dep - Plant - Leach + 2/3 * (R_1 * L_{Ca} + R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * H_{Ca}) + Sm(1) \\ Sm &= 1/3 * (R_1 * L_{Ca} + R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * H_{Ca}) \end{aligned}$$

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<sub>1</sub> – скорость минерализации пула L<sub>Ca</sub>. R<sub>3</sub> – скорость трансформации L<sub>Ca</sub> в F<sub>Ca</sub>. R<sub>2</sub> и R<sub>4</sub> – соответствующие скорости минерализации и трансформации горизонта F<sub>Ca</sub> в H<sub>Ca</sub>. R<sub>5</sub> – скорость трансформации F<sub>Ca</sub> в A1<sub>Ca</sub>. R<sub>6</sub> – скорость минерализации H<sub>Ca</sub>. R<sub>7</sub> – скорость минерализации A1<sub>Ca</sub>. k4, k5, k2, k1, k6 в модели ROMUL зависят от pH.

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, также обеспечивающим стационарную динамику этих пулов.

Рассмотрим некоторые особенности модели ROMUL. В ней различаются три типа пулов органического вещества: опад, подстилка и гумус. При этом опад и подстилка могут быть наземными и подземными (происходящими из корне-

вого опада), различаясь при этом температурно-влажностными условиями. При этом модель описывает динамику произвольного количества фракций наземного/подземного опада и соответствующей подстилки, и пула гумуса.

Все фракции и пулы различаются скоростями разложения, зависящими от содержания азота и зольности фракции (Моделирование динамики..., 2007). На каждом шаге по времени каждая фракция (надземная или подземная) опадом разлагается, при этом часть переходит в соответствующий пул подстилки, а другая минерализуется и уходит в виде CO<sub>2</sub>. Соответственно разложившиеся части подземных (корневых) опадом переходят в пул, который в модели ROMUL называется лабильным гумусом (подземной подстилкой). Затем подстилка преобразуется частично в стабильный (более медленно разлагающийся) гумус, частично минерализуется с выделением CO<sub>2</sub>. Модель работает с месячным шагом, при этом на каждом шаге меняются климатические условия, от которых зависят коэффициенты разложения фракций (Моделирование динамики..., 2007).

Для верификации и калибрации модели ROMUL было проведено моделирование динамики пулов органического вещества на примере ельника-зеленомошно-кустарничкового, произрастающего на Al-Fe-гумусовых подзолах в автономных позициях ландшафта и являющегося наиболее распространенным на Кольском Севере типом еловых биогеоценозов (Лукина, Никонов, 1996). Данный тип леса представляет собой разреженный разновозрастный северотаежный ельник примерно 200-летнего возраста.

Использовался сценарий с 7 фракциями опада (хвоя, ветви, корни, ствол ели, кустарнички и травы, зеленые мхи и корни напочвенного покрова) (Табл. 1). Фракции отличались по содержанию азота, кальция и зольных элементов, а также распределением опада в течение года. Межгодовых колебаний количества опада и содержания в нем элементов питания не производилось. Моделирование проводилось на 200 лет при стационарном климате.

Таблица 1. Характеристика фракций опада

Фракция опада	Хвоя ели	Ветви ели	Корни ели	Ствол ели	Кустарнички и травы	Мхи	Корни напочвенного покрова
Концентрация азота, %	0.78	0.675	0.37	0.2	1.2	1.78	0.47
Концентрация зольных веществ, %	2.8	1.65	0.9	0.29	2.45	2.4	0.99
Концентрация кальция, %	1.3	0.5	0.37	0.12	0.62	0.5	0.13

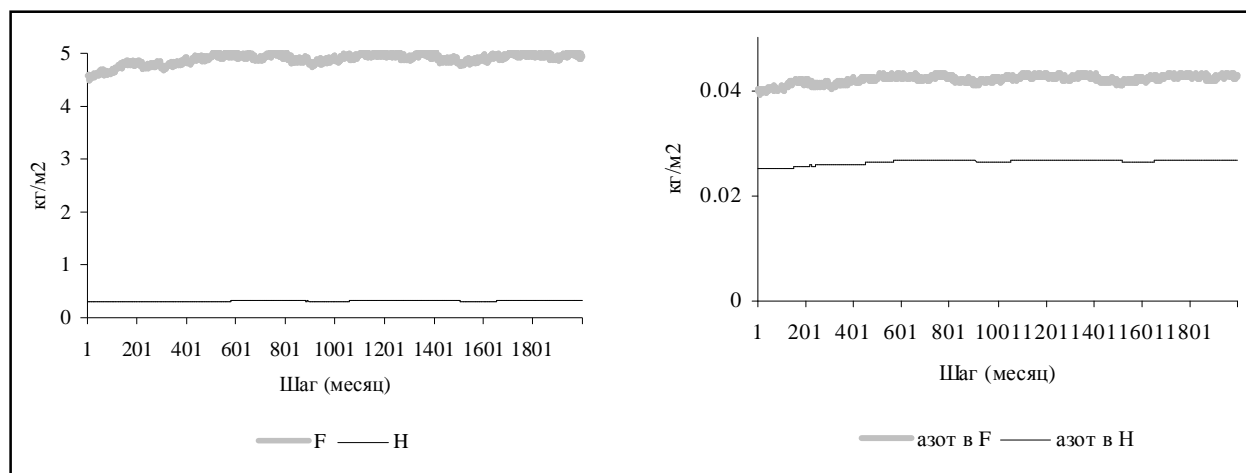
**Таблица 2.** Начальные значения пулов, кг/м<sup>2</sup>

	Кальций	Азот	Органическое вещество
F	0.025	0.04	4.58
H	0.0004	0.025	0.3
Доступный кальций	0.0118		
Ежегодное потребление кальция	0.001841		

При этих входных данных (Табл. 2) и сценариях органическое вещество почвы и соответствующие пулы азота находятся в стационарном состоянии (Рис. 2). Отметим, что для коэффициентов в ROMUL учтены поправки на рН (Динамическое моделирование..., 2007).

Атмосферные выпадения, выветривание и выщелачивание принимались равными нулю. Поступление кальция с опадом за год принималось равным потреблению растениями кальция за год. Дальнейшая калибровка модели для описания динамики пулов Са состояла в поиске поправочных коэффициентов для скоростей разложения  $k_1$ - $k_6$  модели (1). Мы предполагаем, что общая схема преобразования органического вещества описывается моделью ROMUL, а дина-

мика кальция либо опережает (тогда поправка к соответствующему коэффициенту будет больше 1, либо запаздывает по сравнению с динамикой органического вещества (тогда поправка меньше 1). При этом мы опирались на следующие соображения. Часть кальция из  $F_{Ca}$  со скоростями  $R_4$  и  $R_5$  переходит в гумус вместе с органическим веществом почвы и закрепляется в нем (пул  $H_{Ca}$ ). Наличие коэффициента  $R_5$  определяется участием или не участием в разложении червей. В современных бореальных лесах червей мало и можно оставить только коэффициент  $R_4$ , когда идет грибное разложение без участия червей. Таким образом, поправочный коэффициент для  $k_5$  равен 0. При синтезе гумусовых веществ в бореальных лесах образуется очень мало гуматов и фульватов кальция (фракции гумуса, связанные с кальцием, определяются как 2 фракция по методу Плотникова). Слаборастворимыми соединениями являются в основном гуматы кальция, фульваты более растворимы и в них кальций задерживается на меньшее время и в меньших количествах. Исходя из того, что в северных лесах 2-й фракции гуминовых кислот очень мало, мы считаем, что кальций в горизонт H переходит в малых количествах и в основном в виде фульватов. Поэтому мы вводим поправку для уменьшения  $k_4$  (и скорости связывания Са с



**Рис. 2.** Динамика пулов органического вещества (слева) и азота (справа) в ельнике зеленомошно-кустарничковом.

гумусовыми веществами), а  $k_6$  имеет значительно большее значение, чем для углерода благодаря относительно лучшей растворимости фульватов кальция.

В результате численных экспериментов были получены следующие соотношения между коэффициентами  $R_i$  системы (1) и коэффициентами  $k_i$  модели ROMUL, зависящими от перечисленных

выше почвенных характеристик:  $R_1 = k_1$ ;  $R_2 = k_2$ ;  $R_3 = k_3$ ;  $R_4 = 0.4k_4$ ;  $R_5 = 0.0$ . При этих поправках в результате модельного эксперимента на 200 лет мы получили стационарное состояние для динамики пулов кальция в ельнике кустарничково-зеленомошном (Рис. 3). Этот сценарий был принят за контроль для данного типа сообщества при данном климате.

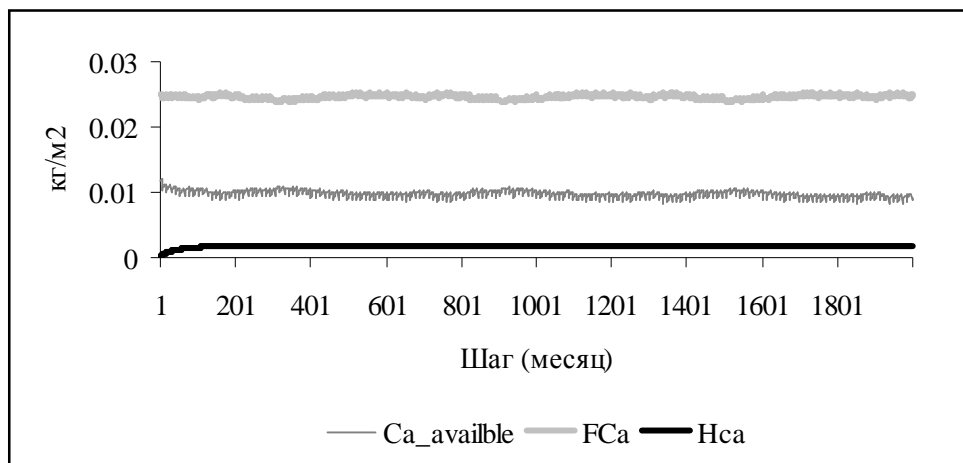


Рис. 3. Динамика пулов кальция в ельнике зеленомошно-кустарничковом.

Таким образом, полученные результаты показывают, что динамика пулов кальция в рамках принятых определений и предположений о возможных основных путях трансформации этих пулов может быть в первом приближении описана системой уравнений (1).

Мы рассмотрели самую простую модель динамики кальция в органических горизонтах почвы в простом случае, когда предположение о стационарности процессов позволило упростить процедуру нахождения коэффициентов в системе (1). Отметим, что подобное предположение является общепринятой процедурой (Foster et al., 2003; Komarov, 2008). Перечислим основные предположения, принятые при проведении численных экспериментов с этой моделью. Мы предполагаем, что 1) в стационарном состоянии во вторичные минералы уходит одна треть кальция, освободившегося при минерализации органического вещества; 2) все вторичные минералы растворяются при весеннем таянии снега и уходят в пул обменного кальция; 3) выщелачивание кальция из почвенного профиля равно его поступлению с осадками; 4) изменения пулов кальция не приводят к изменению pH.

При нестационарной динамике (при таких внешних воздействиях, как сплошные рубки, лесные пожары, выпадение загрязнений из атмосферы) эти предположения могут оказаться недостаточными, что требует дальнейшего развития модели.

Работа поддержана Программой 16 Президиума РАН «Изменения природной среды и климата: природные катастрофы» и грантом РФФИ № 09-04-01209.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 647 с.

2. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях антропогенного загрязнения. В 2-х ч. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1996. ч.1 213 с., ч.2 192 с.

3. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / отв. ред. В.Н. Кудряков. М.: Наука, 2007. 380 с.

4. Likens G.E., Driscoll C.T., Buso D.C., Siccama T.G., Johnson C.E., Lovett G.M., Fahey T.J., Reiners W.A., Ryan D.F., Martin C.W., Bailey S.W. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook // Biogeochemistry. 1998. Vol. 41. pp. 89-173.

5. Johnson D.W., Sogn T., Kvindesland Sh. The nutrient cycling model: lessons learned// Forest ecology and management. 2000. Vol. 138. pp. 91-106.

6. Dauer J.M., Chorover J., Chadwick O.A., Oleksyn J., Tjoelker M.G., Hobbie S.E., Reich P.B., Eissenstat D.M. Controls over leaf and litter calcium concentrations among temperate trees // Biogeochemistry. 2007. Vol. 86. pp. 175-187.

7. Sverdrup H. Geochemistry, the key to understanding environmental chemistry // The science of the total environment. 1996. Vol. 96. pp. 67-87.

8. Walse C. Element cycling in forest soils: modelling the effects of a changing environment. Doctoral thesis. Lund University, Lund, Sweden, 1998. 62 p.

9. Cromack K.JR, 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. pp. 463-468.

10. Foster D., Swanson F., Aber J., Burke I., Brokaw N., Tilman D., Knapp A. The importance of land-use legacies to ecology and conservation // Bioscience. 2003. Vol. 53, 77-88.

11. Komarov A.S. Use of mathematical models for assessing the pool and dynamics of carbon in forest soils // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41 (13). pp. 1387-1397.

## **MODELING OF CALCIUM DYNAMICS IN NORTHERN TAJGA FOREST SOILS**

© 2009 **Y.S. Khoraskina<sup>1</sup>, A.S. Komarov<sup>1</sup>, M.G. Bezrukova<sup>1</sup>, N.V. Lukina<sup>2</sup>, M.A. Orlova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of physico-chemical and biological problems in soil science of the Russian academy of sciences;  
e-mail: yulia\_hor@rambler.ru; <sup>2</sup> as\_komarov@rambler.ru; <sup>3</sup>work.message.system@gmail.com

<sup>2</sup>Center of forest ecology and productivity problems of the Russian academy of sciences;  
e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

Model of soil calcium dynamics in northern tajga forest ecosystem is developed. It describes calcium flows between pools of soil organic matter. Inputs are air deposition and weathering from minerals. 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 are used from north taiga forests in Kola Peninsula.

Key words: *calcium circulation, mathematical modeling of ecosystems, secondary minerals, influence pH.*