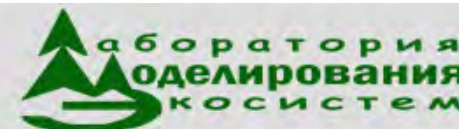


Моделирование динамики органического вещества и азота в почве в стационарных и нестационарных условиях

**Александр Сергеевич Комаров
и команда ROMUL**



**Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН**



Почва – это кошмар для модельера!

С.И.Барцев
Экоматмод2009



Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН



Два подхода к построению моделей

- (1) модель основана на большом множестве экспериментальных данных, обработанных статистически с целью нахождения возможных количественных соотношений
- (2) Модель есть аккуратно собранная система гипотез, изложенная математическим языком с целью построения теории объекта (И.А.Полетаев (по А.А.Титляновой)). В этом случае экспериментальные данные используются для калибровки и верификации модели, то есть для проверки справедливости множества допущений модели, выраженных в количественной форме.

Цели моделирования

1. Описать динамику лесной экосистемы с учетом того, что почва является неотъемлемой ее частью, при медленных изменениях внешних факторов (изменения климата, загрязнения и т.п.)
2. Та же цель при катастрофических (быстрых) воздействиях (лесные пожары, сплошные рубки, изменения природопользования и т.п.)
3. Предсказать динамику не только углерода, но и других элементов почвенного питания растений как единой системы

Модели могут быть различными по сложности (для первого подхода простейшими являются регрессионные модели)

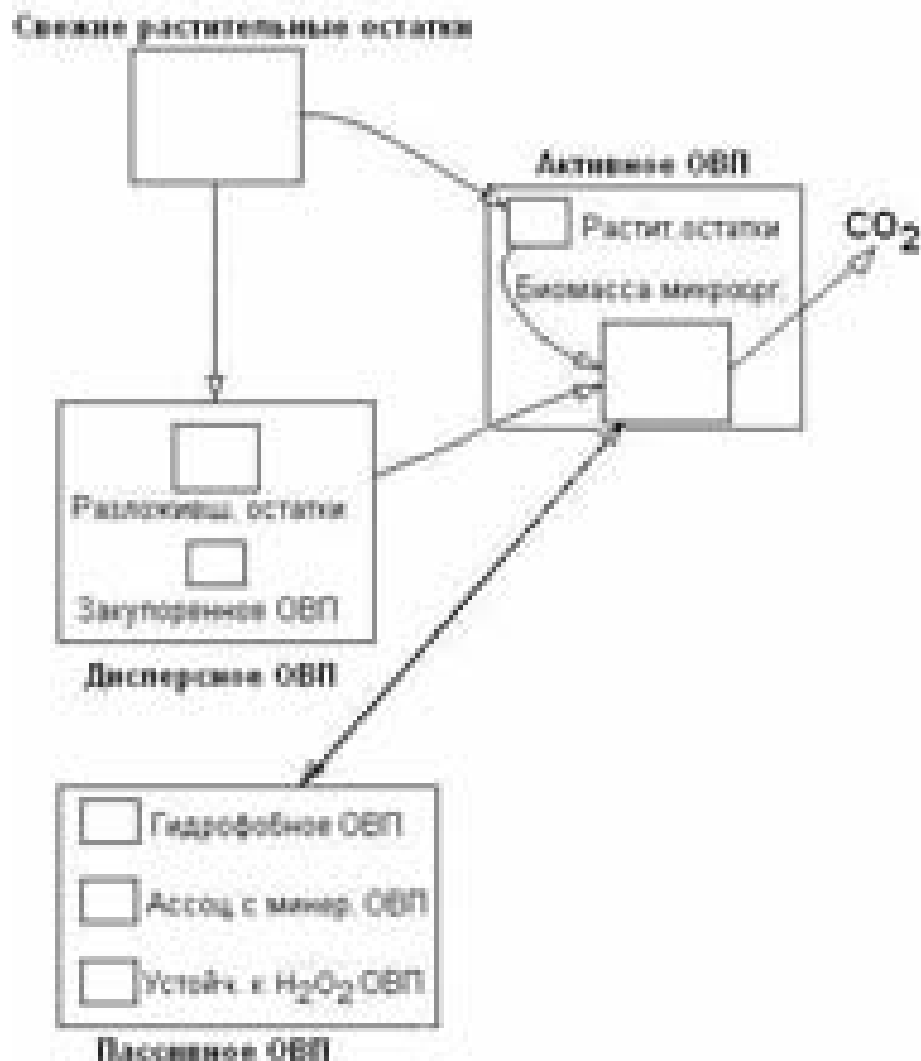
Роль разных частей экосистемы возрастает при катастрофических воздействиях (например, рост живого напочвенного покрова после лесного пожара или сплошной рубки)



Моделирование динамики органического вещества почвы: основные проблемы

- Как разделить органическое вещество почвы на разные фракции, которые минерализуются и гумифицируются с разными скоростями?
- Как оценить скорости минерализации и гумификации этих фракций?
- Как оценить точность этих оценок?
- Какова неопределенность при инициализации модели?

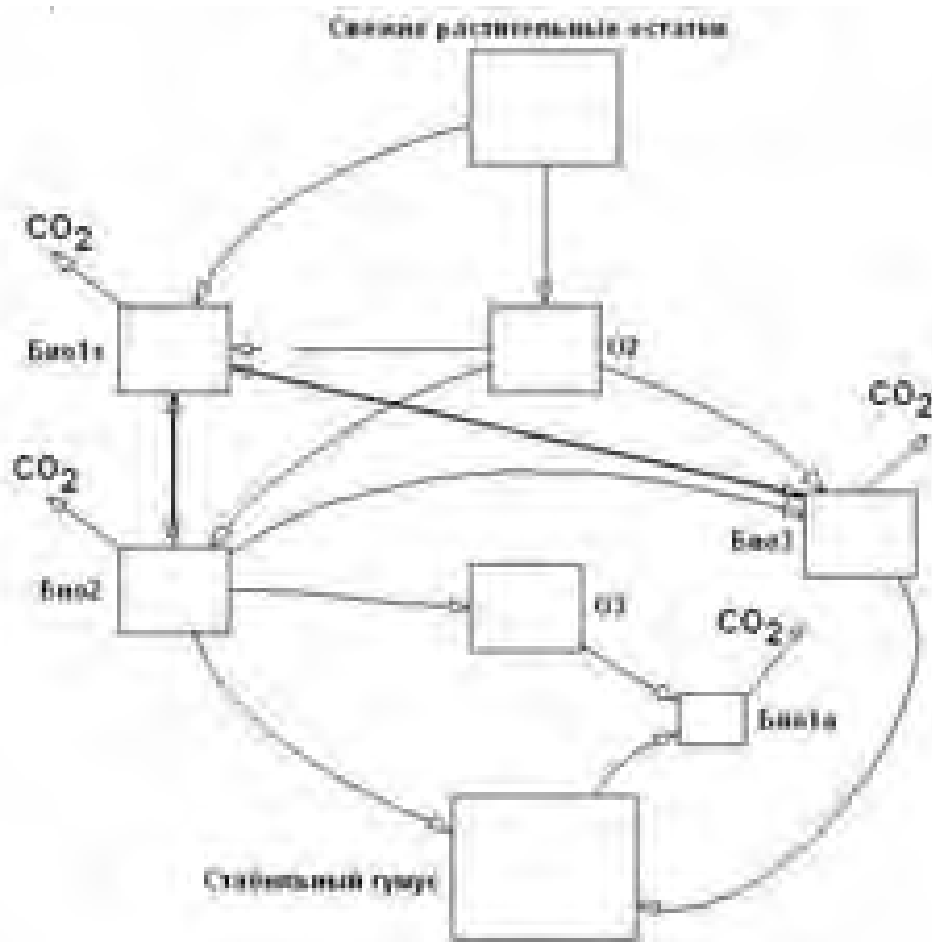
Общая схема моделей, основанных на фракционировании органического вещества (Century, RothC, Yasso)



Теория закрепления продуктов метаболизма биоты: Свежие растительные остатки – опад растений и отмершие остатки других организмов; Растит. остатки – легко разлагаемые компоненты растительных остатков; Биомасса микроорг. – биомасса всех почвенных микроорганизмов; Разложивш. остатки – общая масса всех частично минерализованных остатков; Закупоренное ОВП – закупоренное ОВП в почвенных микроагрегатах, недоступное для микроорганизмов; Гидрофобное ОВП – недоступное для микроорганизмов ОВП за счет формирования гидрофобных поверхностей; Ассоц. с минер. ОВП – ассоциированное с почвенными минералами ОВП с удельной массой более 1,6-2,0 г/см³; Устойч. к H₂O₂ ОВП – устойчивое против разложения H₂O₂ ОВП; CO₂ – эмиссия углекислого и других парниковых газов из почвы. Двусторонняя стрелка – потребление ОВП микроорганизмами и поток продуктов метаболизма организмов

Чертов, Комаров, Почвоведение, 2013, №7

Общая схема моделей, основанных на теории гумификации (Romul)

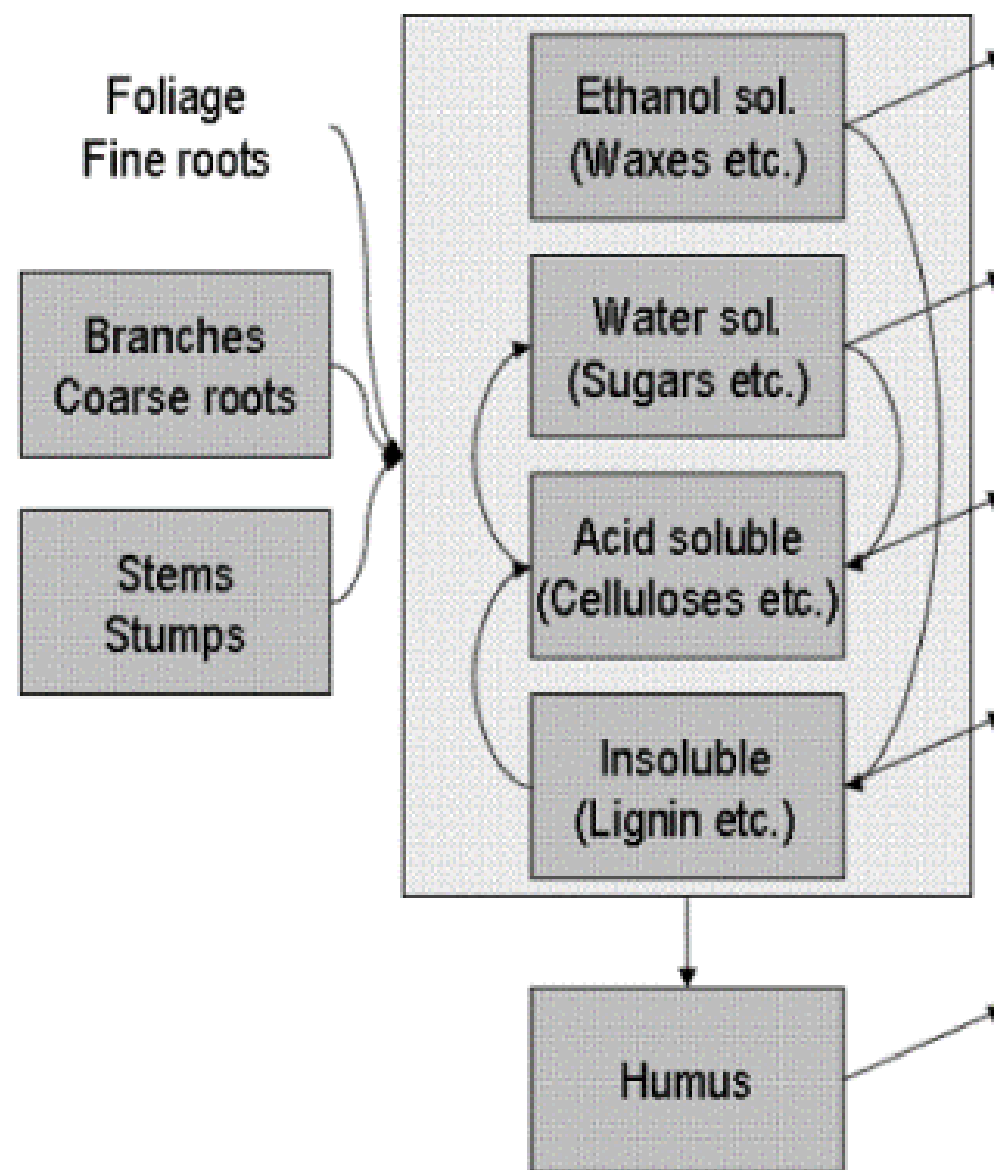


Теория гумификации: Свежие растительные остатки – то же, что и в А; О2 – среднеразложившийся частично гумифицированный органический горизонт; О3 – сильно разложившийся гумифицированный органический горизонт. Стабильный гумус – конечный продукт гумификации в гумусово-аккумулятивном горизонте почвы; Био13 – сообщество организмов-деструкторов свежих растительных остатков (минерализаторы: грибы, актиномицеты и зимогенная микрофлора; потребители микробной биомассы: панцирные клещи и простейшие). Био2 – сообщество организмов-деструкторов частично гумифицированного материала (несколько трофических уровней потребителей биомассы Био13, формирующих гумифицированный материал органического горизонта и минеральной почвы. Био3 – сообщество мезофауны с доминированием дождевых червей и энхитреид (Lumbricidae), которое потребляет опад и биомассу сообществ Био13 и Био2 и формирует пул стабильного гумуса в гумусово-аккумулятивном горизонте почвы; Био1а – аналог Био13, но с доминированием автохтонной микрофлоры, минерализующей гумусовые вещества почвы.

Чертов, Комаров, Почвоведение, 2013, №7

Схема модели YASSO7

(Liski et al., 2005; Tuomi et al., 2008)



Параметризация модели YASSO7 (Liski et al., 2005; Tuomi et al., 2008)

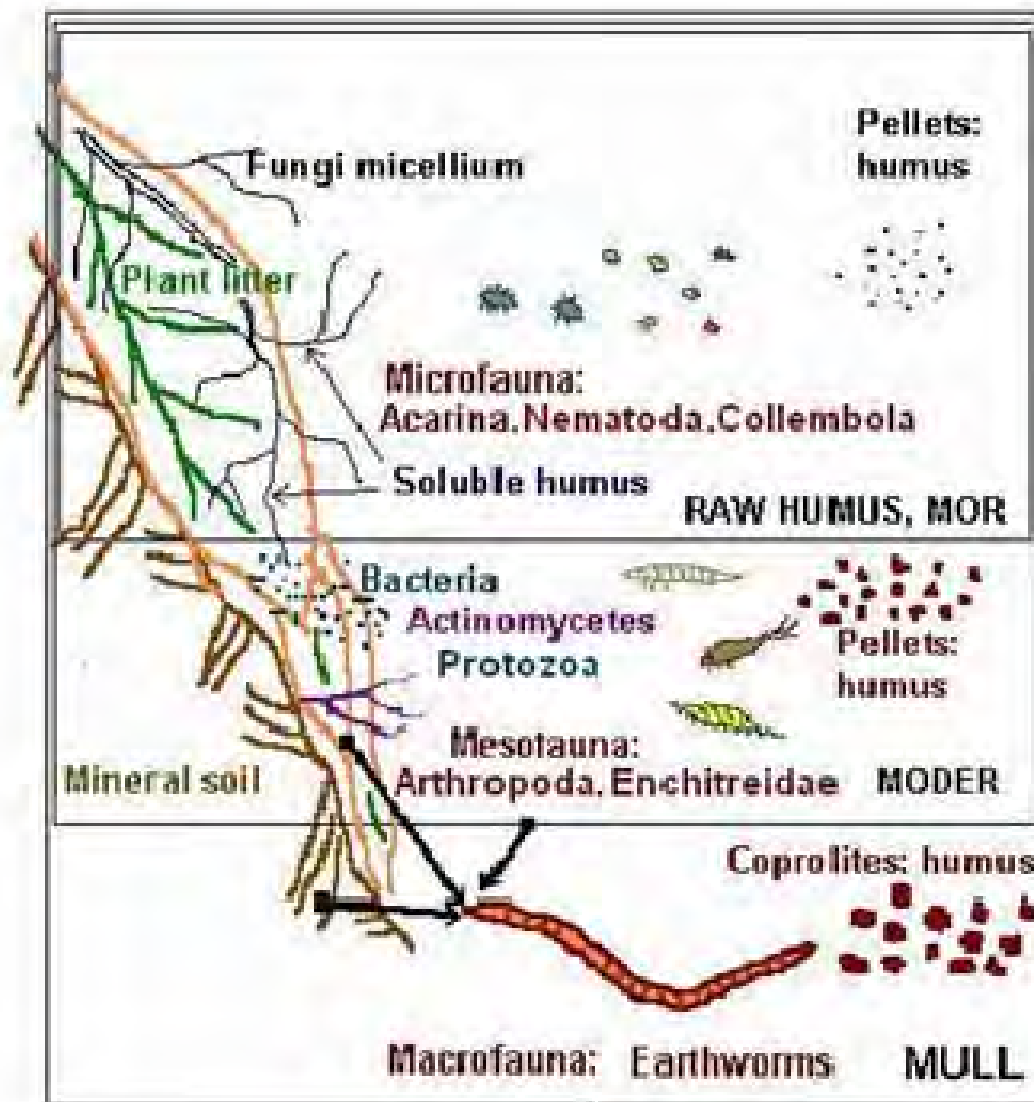
- Скорости перехода между компартментами не могут быть измерены экспериментально
- В Yasso07 предполагается, что все переходы из одного компартмента в другой возможны, тогда скорости можно оценить по экспериментальным данным. Скорости трансформации компартментов были определены одним из методов Монте-Карло (MCMC метод).
- При этом использовались следующие экспериментальные данные:
- Образцы опадов
 - 10 000 потерь веса при разложении по 70 000 образцам
 - 34 вида опадов
- Данные по временным последовательностям
 - Накопление почвенного углерода в 26 местообитаниях по 5500 – летней временной последовательности в южной Финляндии



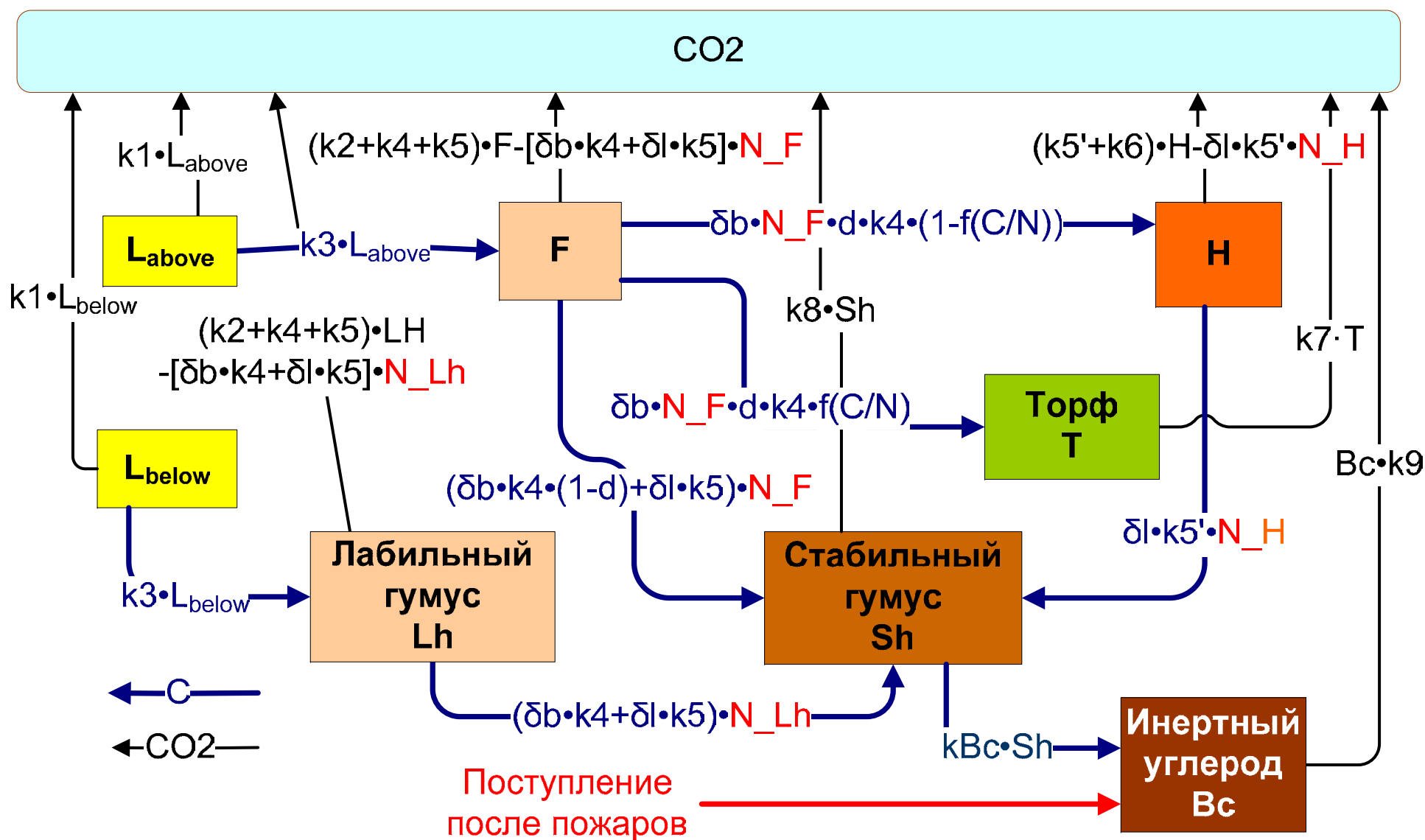
Основные предположения модели ROMUL (Chertov et al., 2001)

- Выделение трех комплексов организмов-деструкторов, влияющих на разложение органического вещества опада и почвы
- Минерализация и гумификация органического вещества почвы в зависимости от температуры и влажности почвы, содержания азота и зольности когорты опада, отношения C/N в минеральной почве
- Разделение на напочвенные и внутрипочвенные когорты опада
- Вычисление динамики органического вещества почвы и азота почвы с оценкой потока CO_2 из почвы и азота, доступного для растений

Стадии трансформации органического вещества почвы



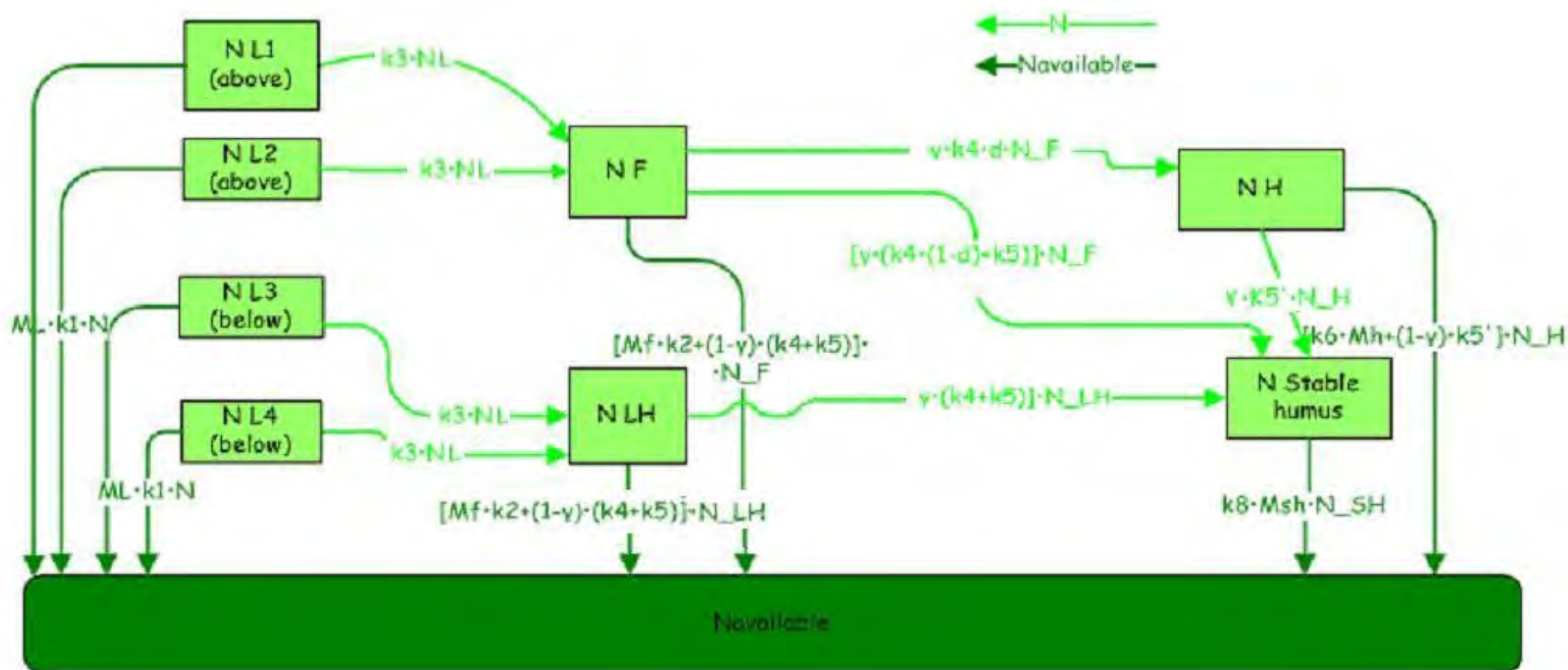
Генерализованные пулы и потоки органического вещества почвы в модели ROMUL



Генерализованные пулы и потоки органического вещества почвы в модели ROMUL

Для упрощения моделирования мы использовали базовую модель динамики органического вещества ROMUL для оценки скоростей трансформации элементов почвенного питания. Мы предположили, что динамика азота и кальция следует этой трансформации, но различается в значениях коэффициентов. Эта разница может быть выражена как поправки к коэффициентам в ROMULe, которые мы можем оценить по экспериментальным данным, полученным в местообитаниях, которые мы можем считать находящимися в состоянии равновесия (steady state)

Генерализованные пулы и потоки азота в модели ROMUL



Пример системы уравнений для версии модели ROMUL

Динамика органического вещества

$$dL/dt = L_0 - (k_1 + k_3)L,$$

$$dF/dt = k_3L - (k_2 + k_4 + k_5)F,$$

$$dH/dt = (\delta_{Artr} k_4 + \delta_{Lumb} k_5) N_F - k_6 H,$$

$$H_{miner} = (k_1 + k_3)L + (k_2 + k_4 + k_5)F - \delta_{Artr}(k_4 N_F) - \delta_{Lumb}(k_5 N_F) + k_6 H$$

Динамика азота

$$dN_L/dt = N_{L0} - (k_1 + k_3)N_L,$$

$$dN_F/dt = ((1 - M_L)k_1 + k_3)N_L - (k_2 + k_4 + k_5)N_F,$$

$$dN_H/dt = ((1 - M_F(F, N_F))k_2 + \gamma(k_4 + k_5))N_F - k_6 M_H(H, N_H)N_H,$$

$$N_{avail} = k_1 M_L N_L + k_2 M_F N_F + (k_4 + k_5)N_F + k_6 M_H(H, N_H)N_H$$

$$\delta_{Lumb} = 2\gamma R_{Lumb} = 12.8$$

$$\delta_{Artr} = 2\gamma R_{Artr} = 24.0$$

Зависимости коэффициентов модели ROMUL

$$k_i = K_i(C_N, C_{Ash}) \cdot f(T) \cdot g(W)$$

C_N – содержание азота (%),

C_{ash} – зольность (%),

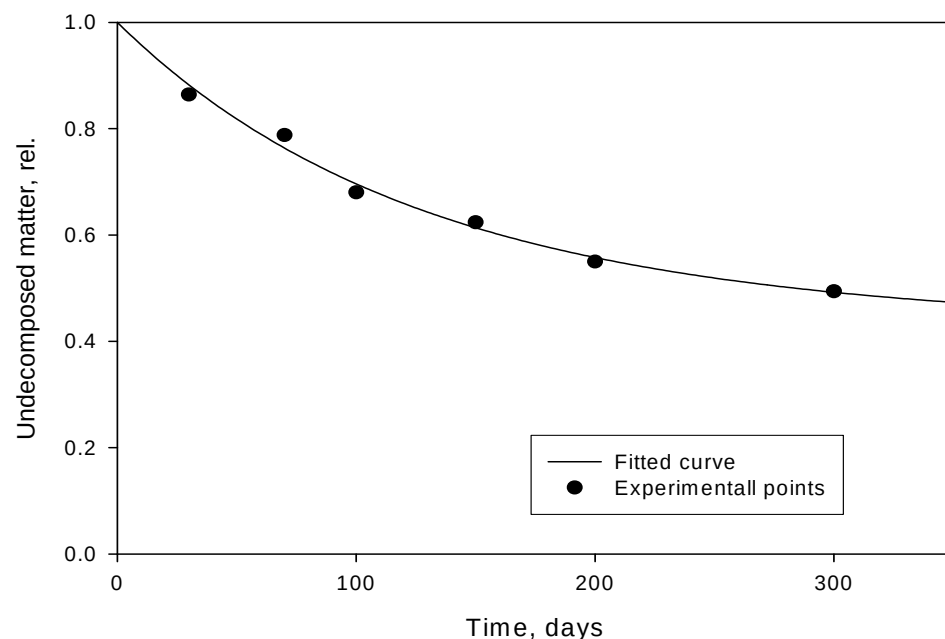
T – температура почвы (лесной подстилки), °C,

W – влажность почвы (лесной подстилки), масс %.

Экспериментальная основа модели ROMUL

Лабораторные эксперименты по определению скоростей минерализации свежего опада и органического вещества почвы с известным химическим составом в контролируемых условиях: опубликованные результаты и специальные эксперименты в БИНИИ Санкт-Петербургского университета, ИФХиБТПП РАН

Pinus Sylvestris



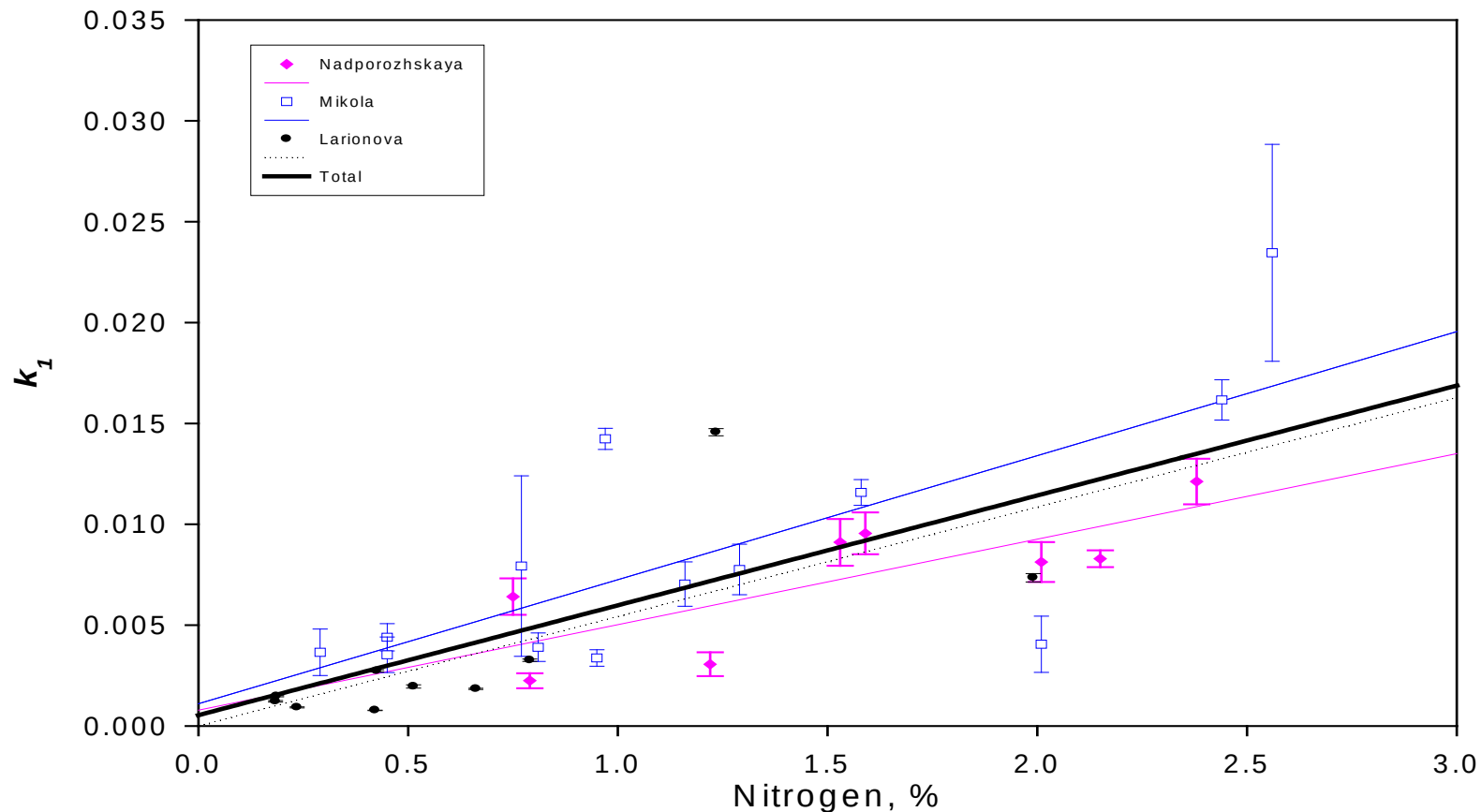
Коэффициенты определялись методом Марквардта и МСМС методом

Были найдены зависимости Скоростей минерализации От азота и зольности, а также От температуры и влажности почвы

Оценка скоростей минерализации

$$k_{1L} = 0,0005 + 0,0054 C_N \text{ [day}^{-1}\text{]}$$

$$SE = 0,0036, R^2 = 0,55$$



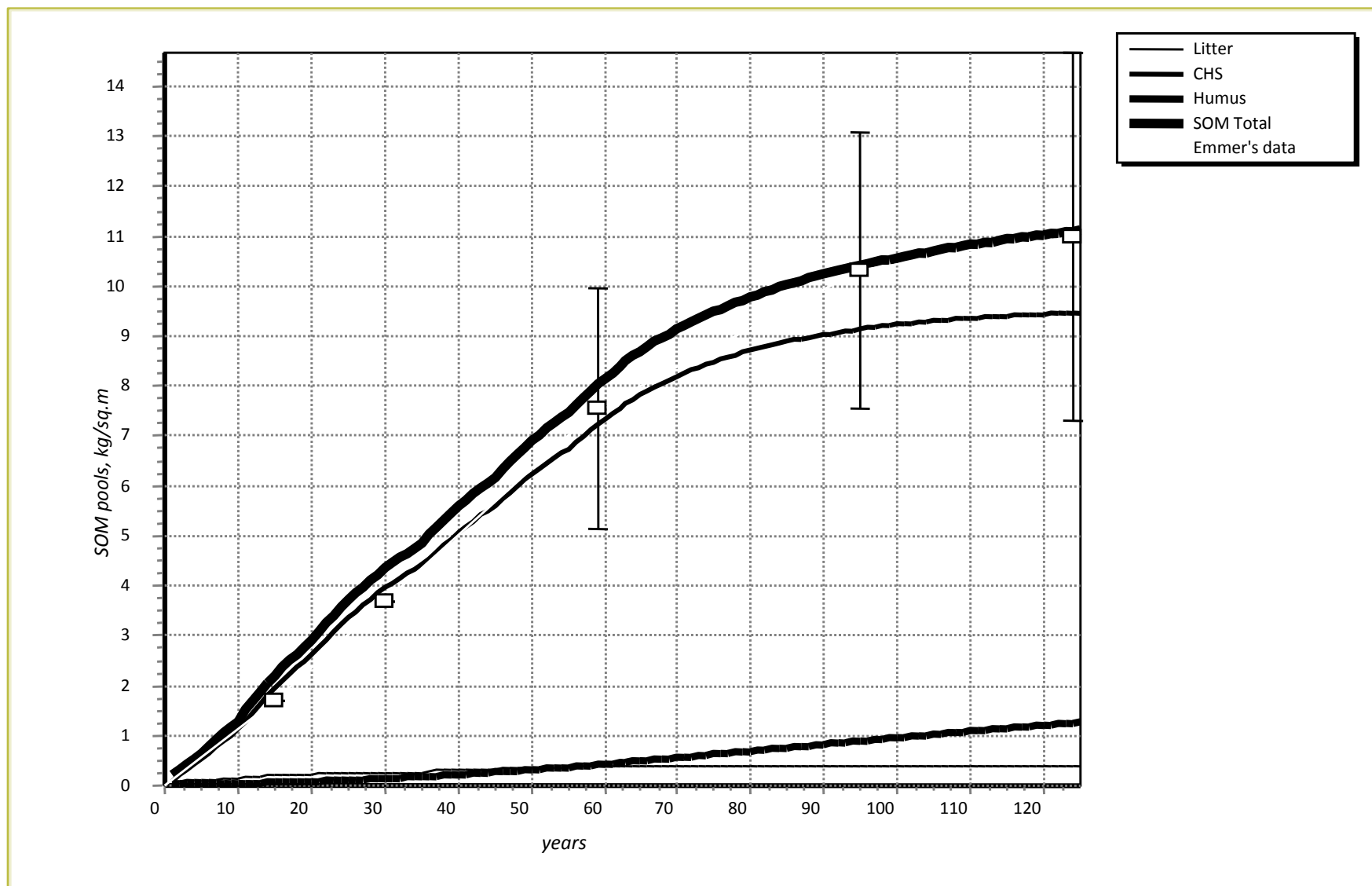
Зависимость скорости минерализации (k_1) для поверхностного опада от содержания азота



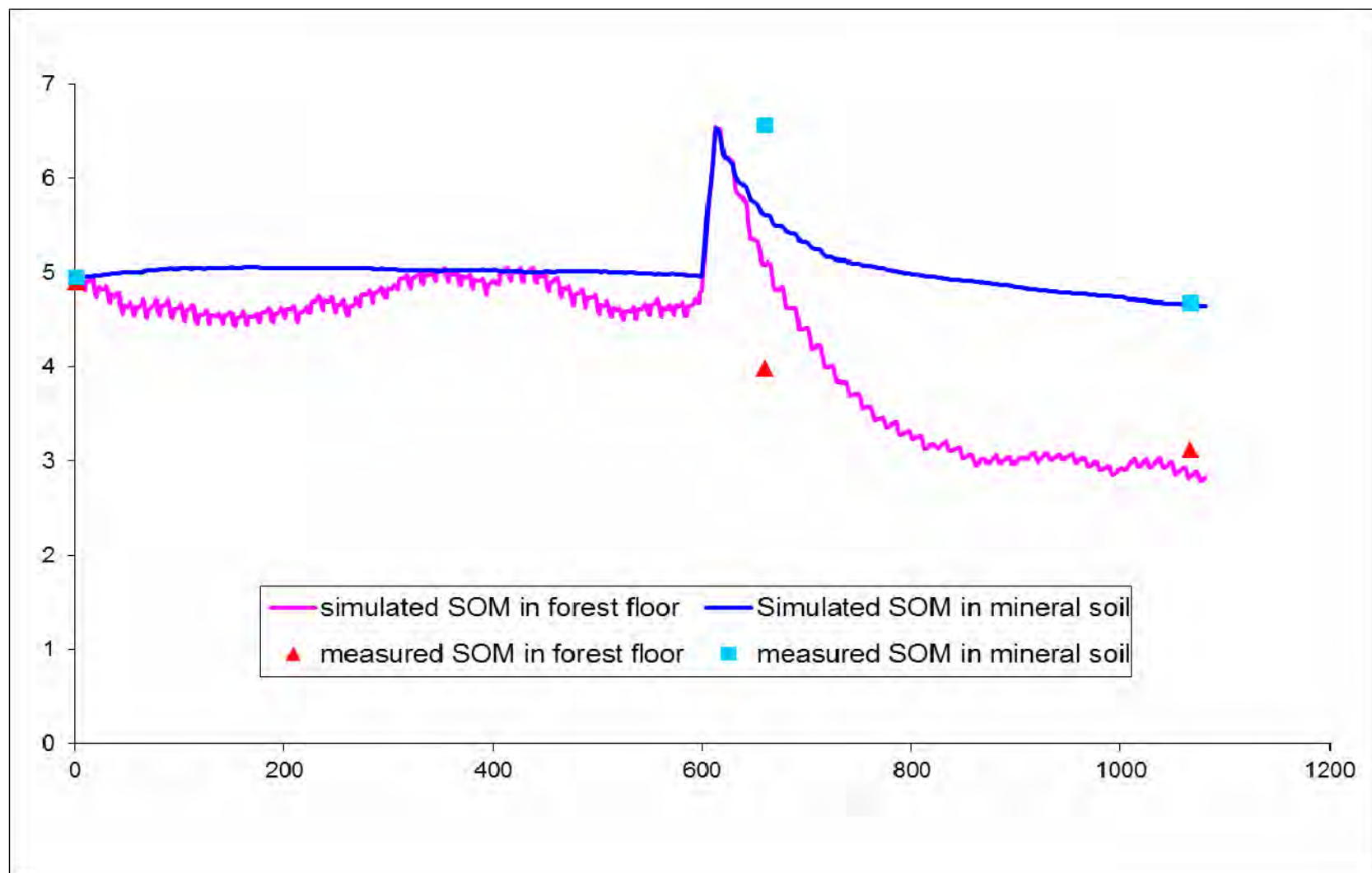
Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН



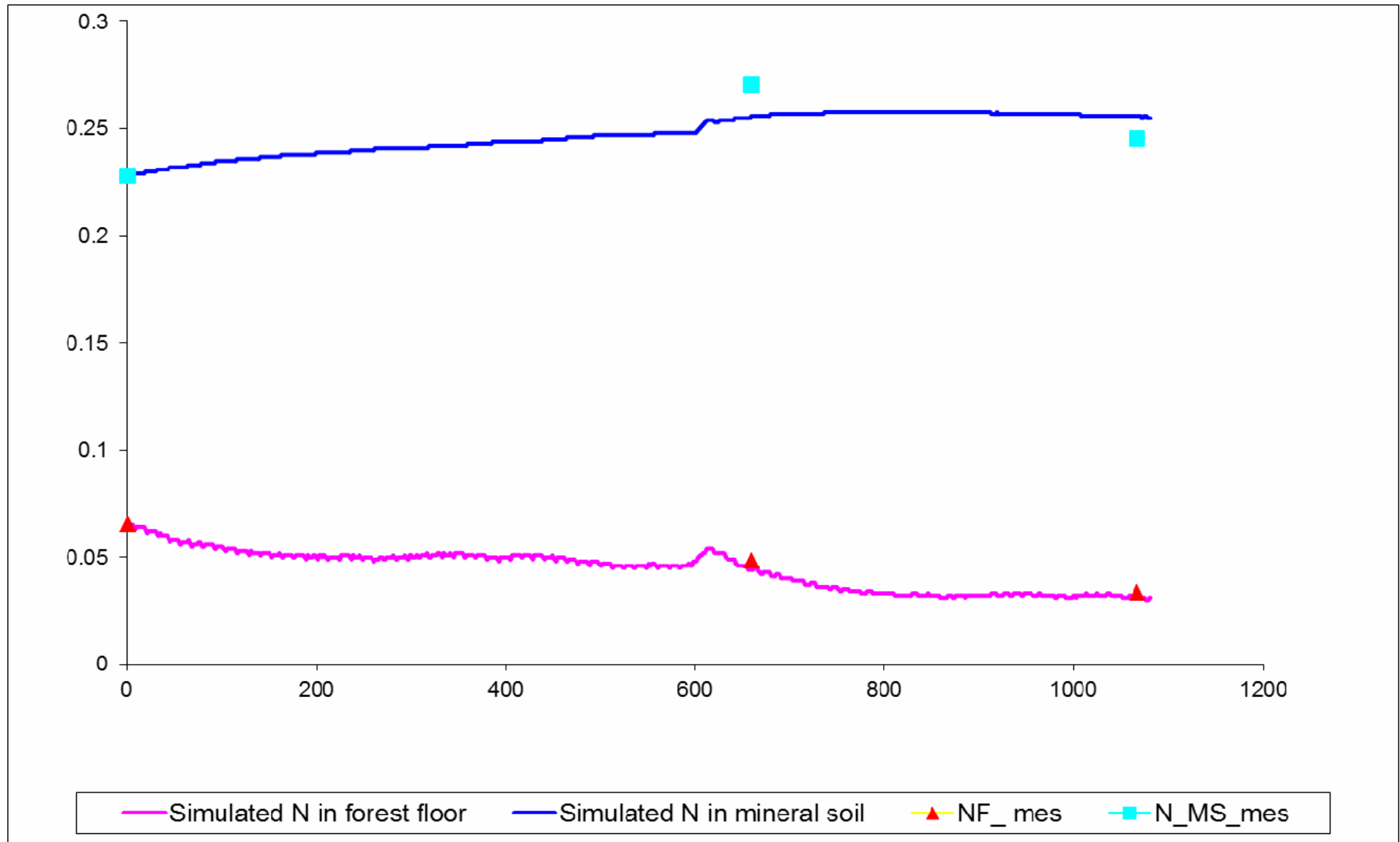
Сравнение экспериментальных данных (Emmer, 1995; Nadrporozhskaya et al., 2009) с модельными прогонами



Результаты моделирования динамики органического вещества лесной подстилки и минеральной почвы при переходе от елового леса к смешанному лесу после сплошных рубок (данные по средней тайге, Республика Коми)

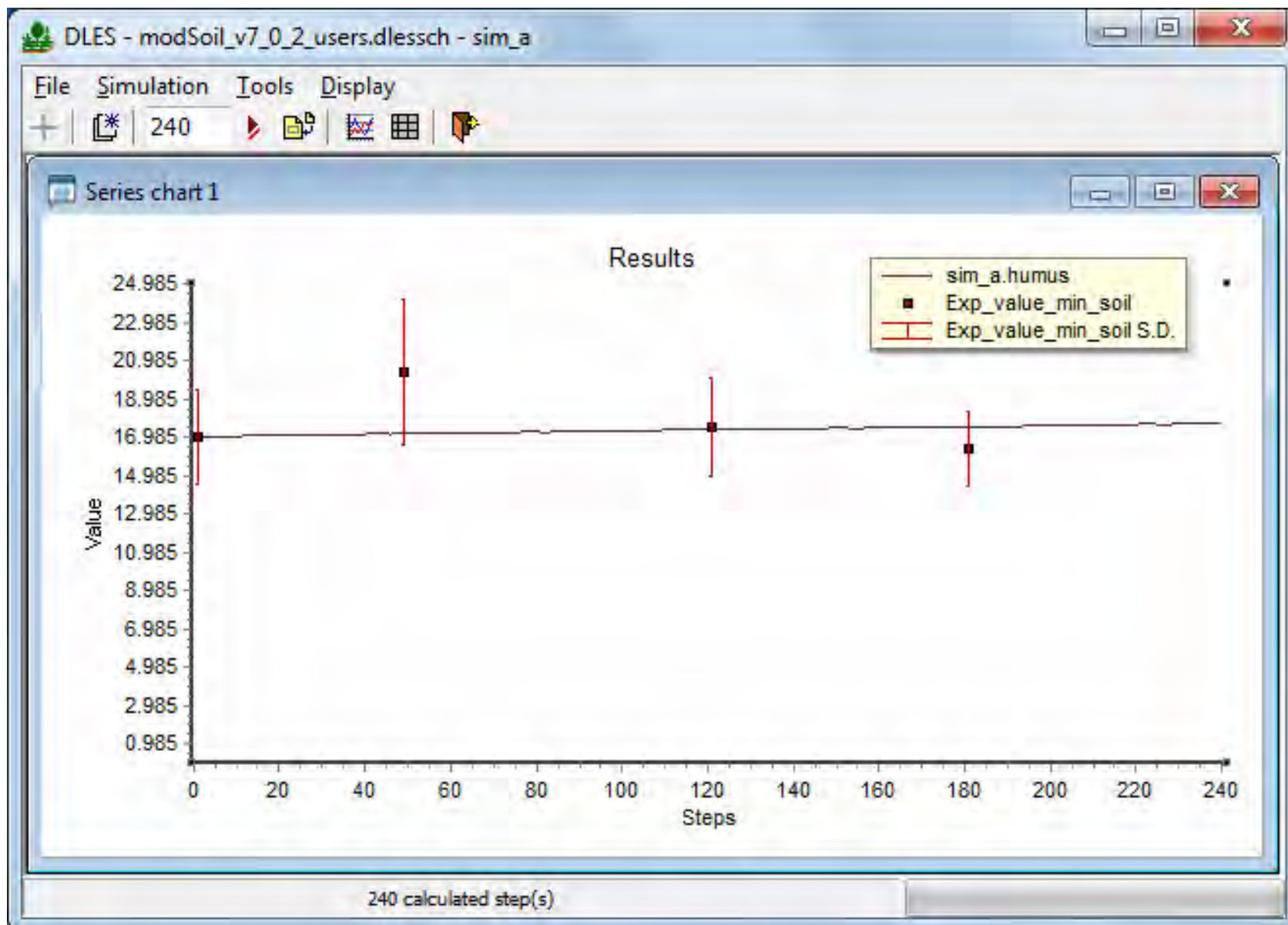


Результаты моделирования динамики азота в лесной подстилке и минеральной почве после сплошных рубок (данные по средней тайге, Республика Коми)



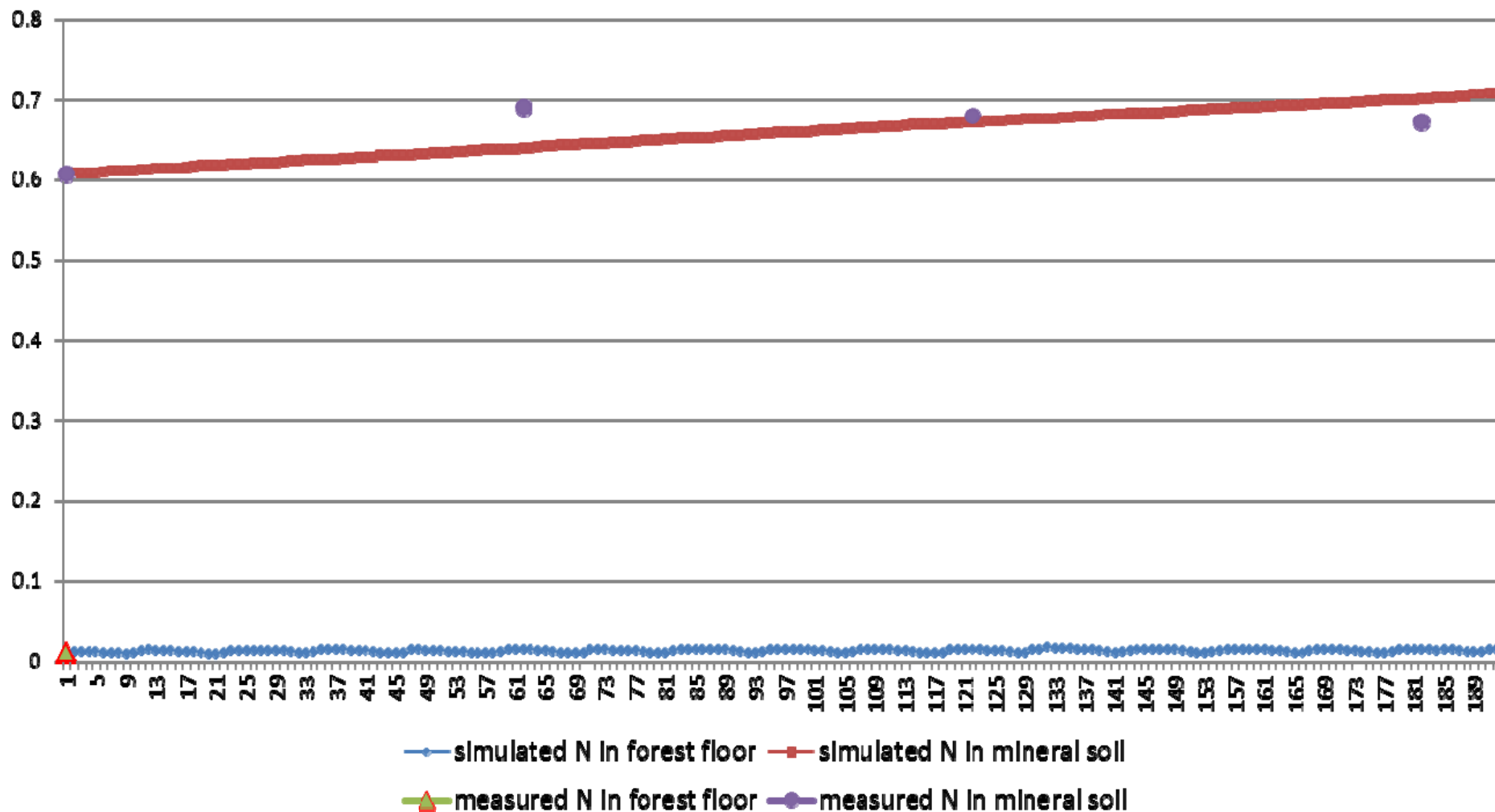
Лесная опытная станция Alice Holt (Великобритания)

Моделирование динамики органического вещества в лесной почве дубравы с 1994 по 2009. Органическое вещество и содержание азота в минеральной почве измерялось четыре раза: в 1994 (начальное состояние), 1999, 2004 и 2009.

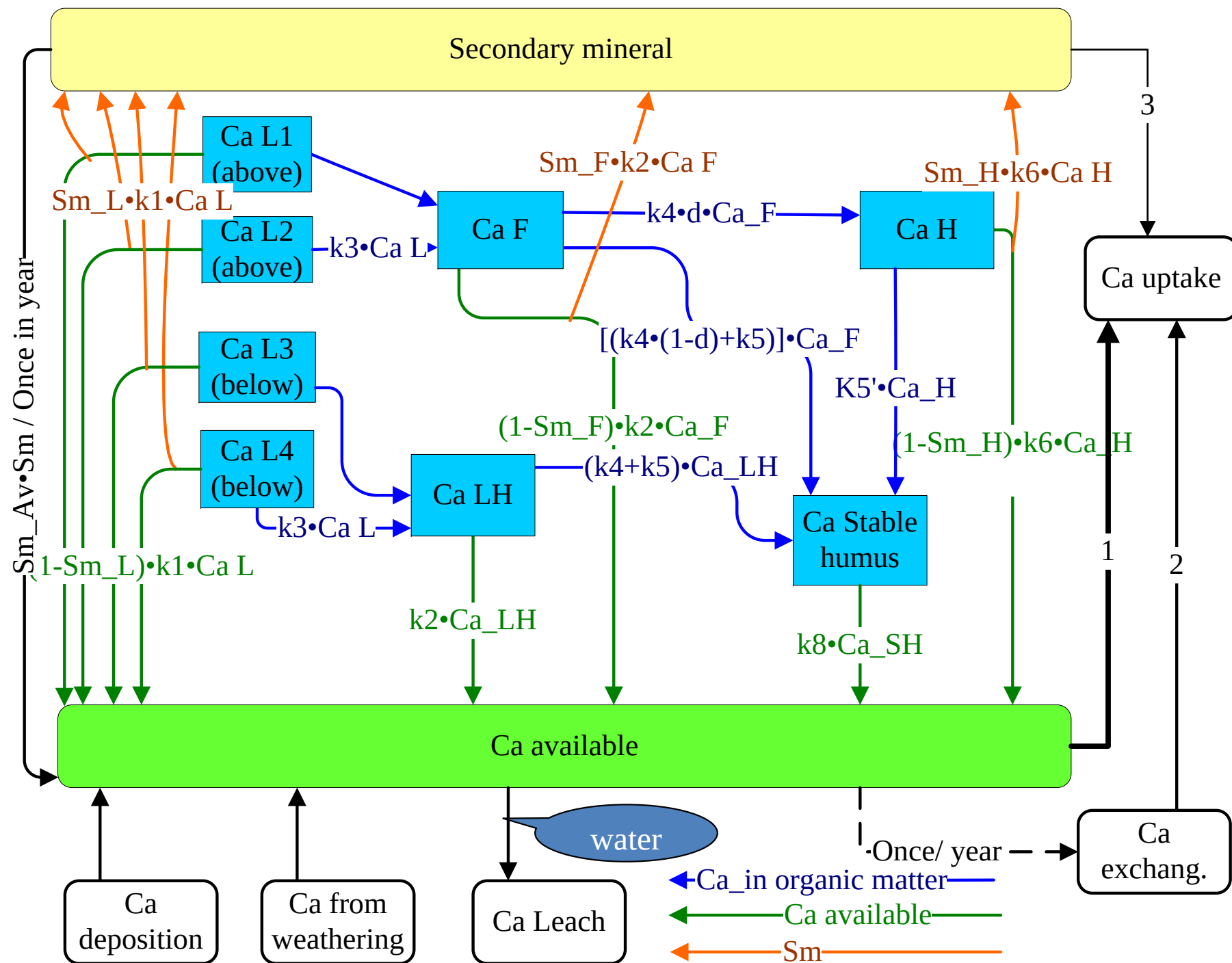


Лесная опытная станция Alice Holt (Великобритания)

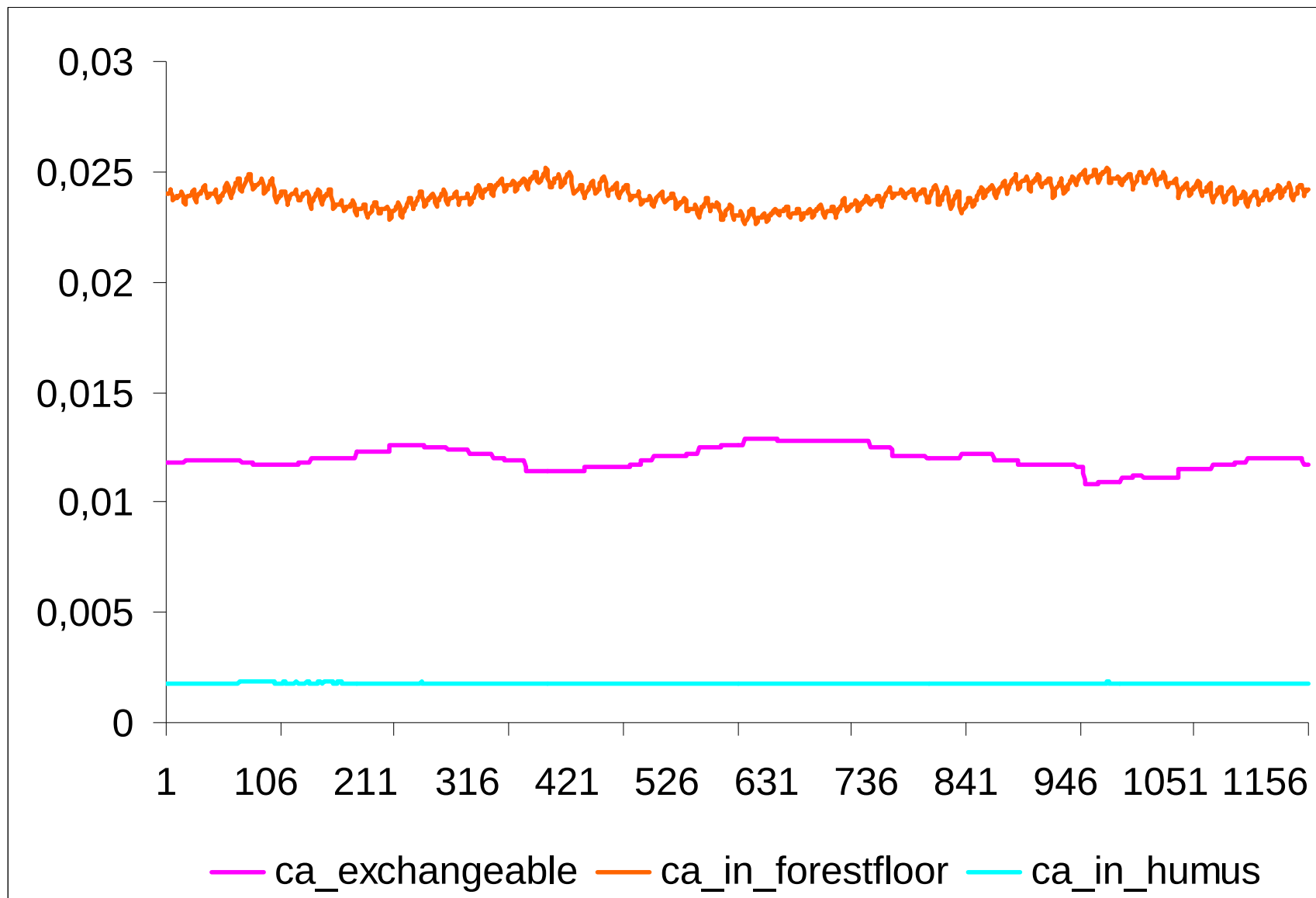
Моделирование динамики азота вещества в лесной почве дубравы с 1994 по 2009



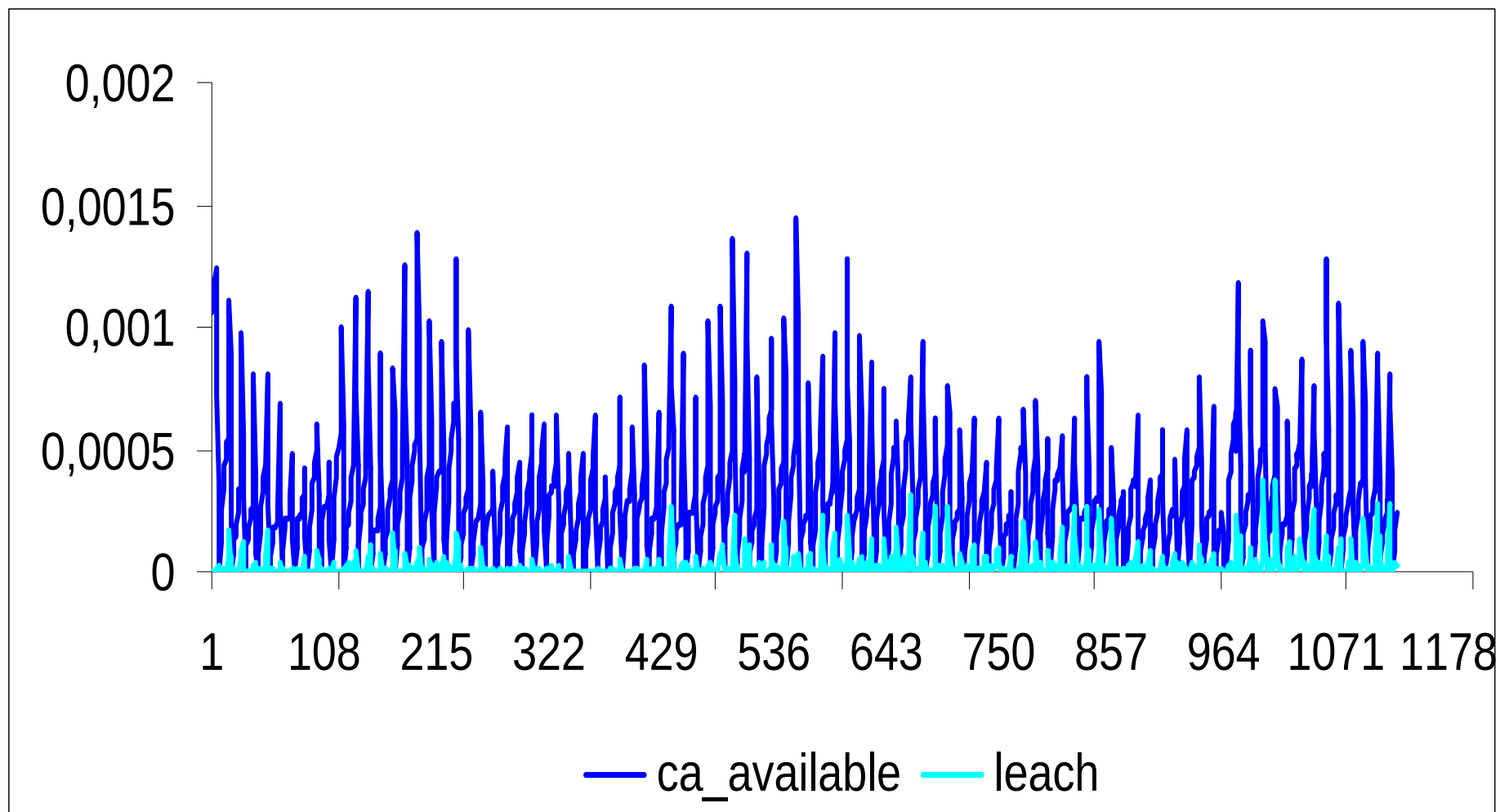
Блок-схема модели динамики кальция в почве



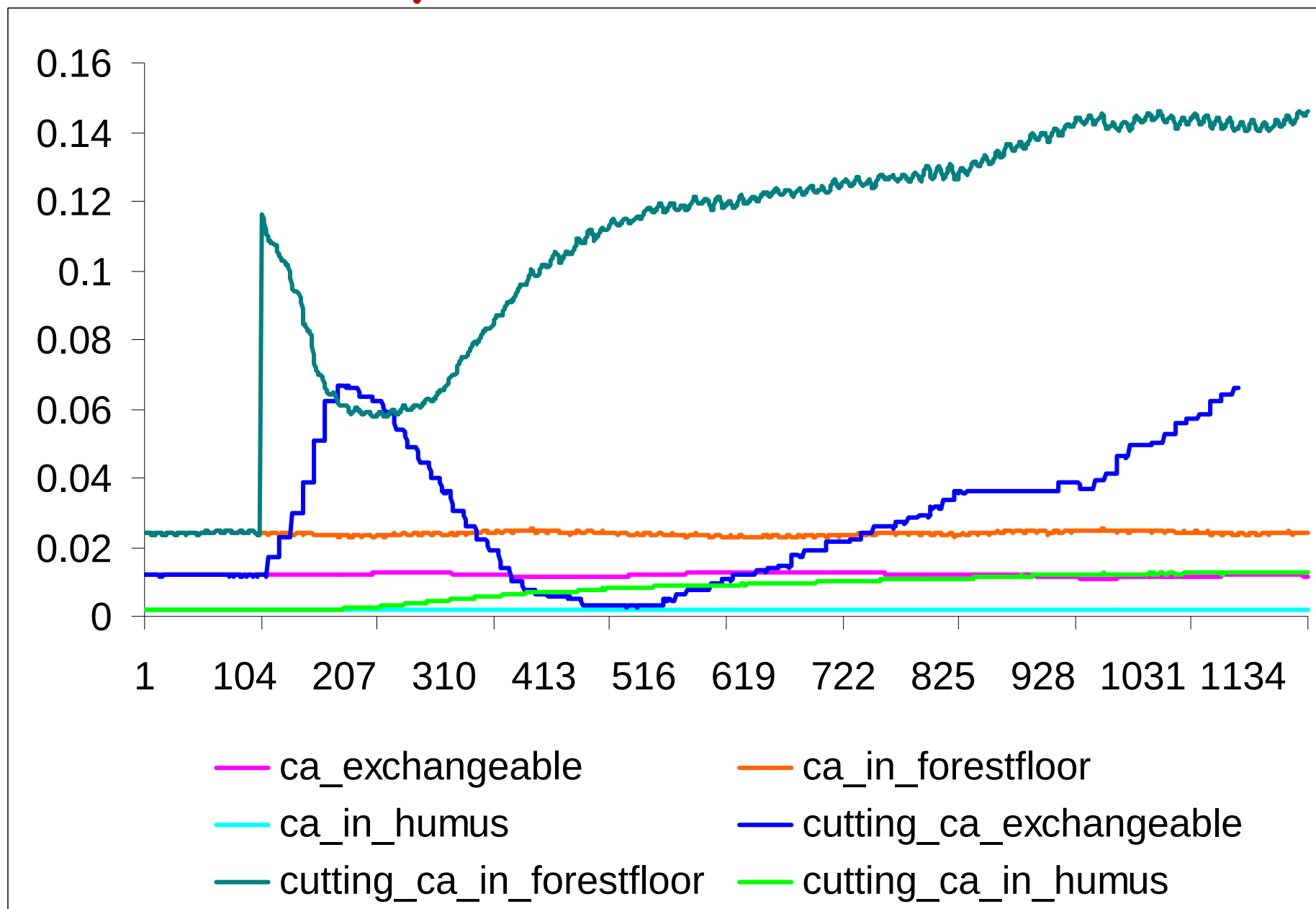
Динамика кальция в еловом лесу в северной тайге России кг.кв.м, с месячным шагом - 1



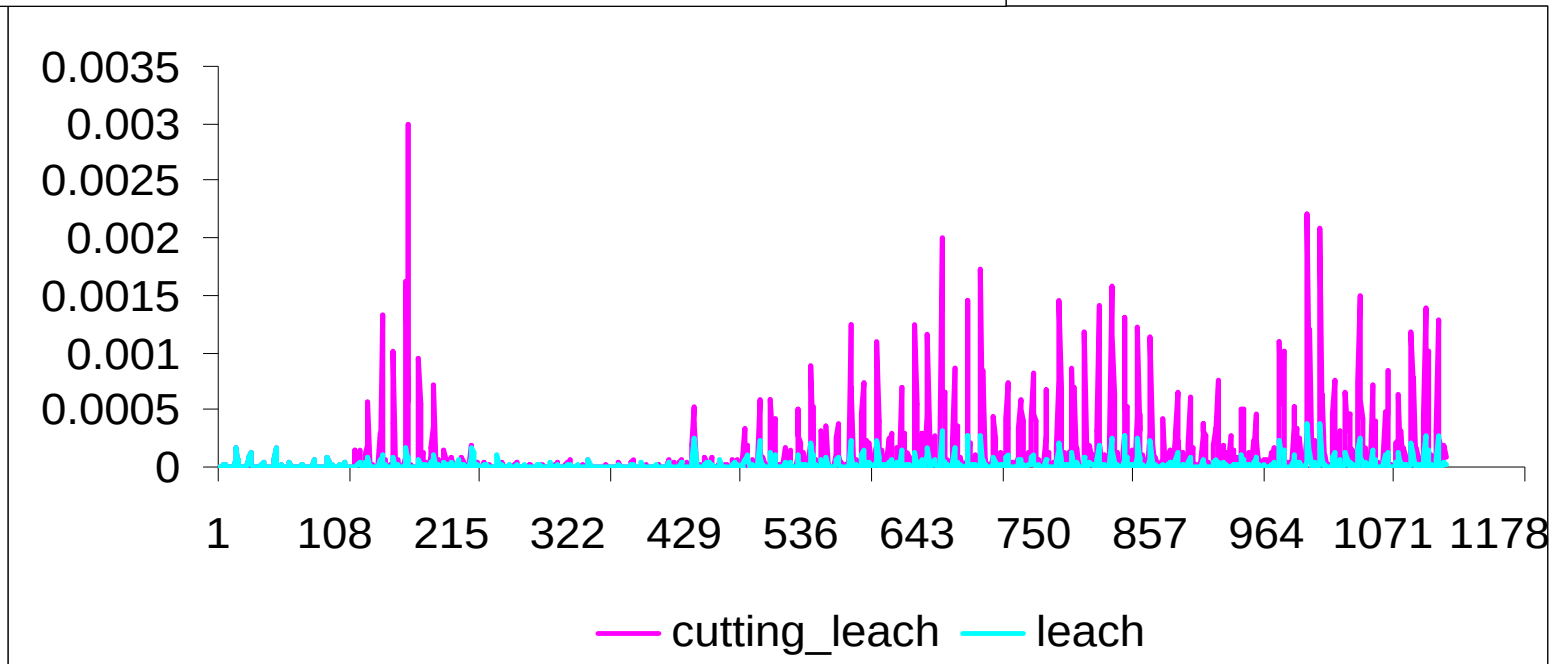
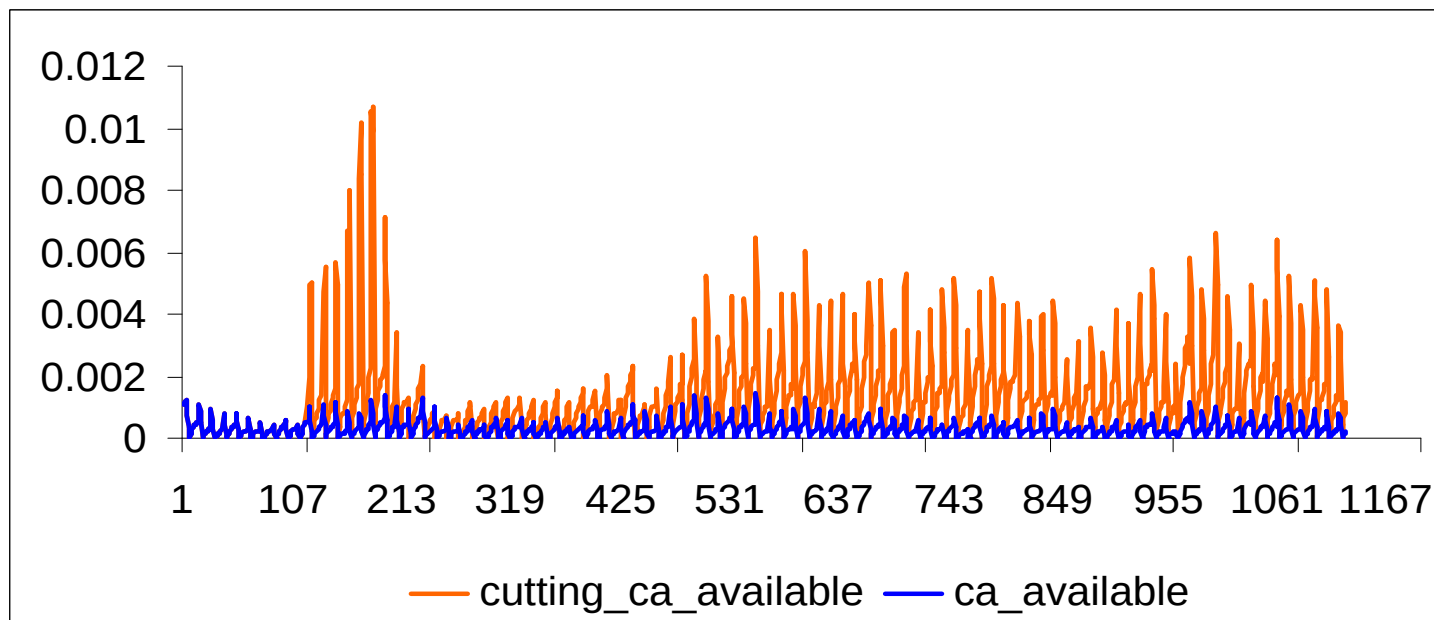
**Динамика кальция в еловом лесу в
северной тайге России
кг.кв.м, с месячным шагом - 2**



Динамика кальция после сплошной рубки в северной тайге России кг.кв.м, с месячным шагом - 1



Динамика кальция после сплошной рубки в северной тайге России кг.кв.м, с месячным шагом - 2





World Meteorological Organization
A specialized agency of the United Nations

Press Release

Weather • Climate • Water

For use of the information media
Not an official record

EMBARGO 1030 GMT, TUESDAY 20 NOVEMBER 2012

GREENHOUSE GAS CONCENTRATIONS REACH NEW RECORD

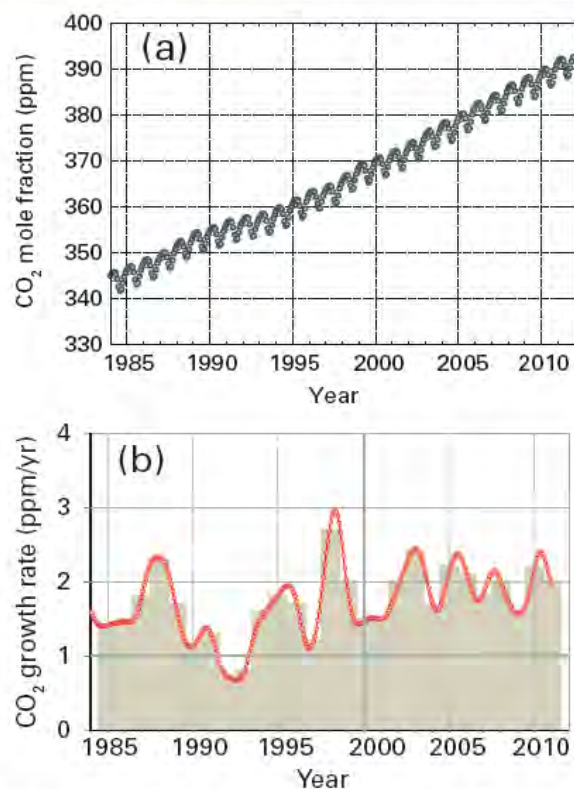


Figure 3. Globally averaged CO₂ mole fraction (a) and its growth rate (b) from 1984 to 2011. Annually averaged growth rate is shown by columns at (b).

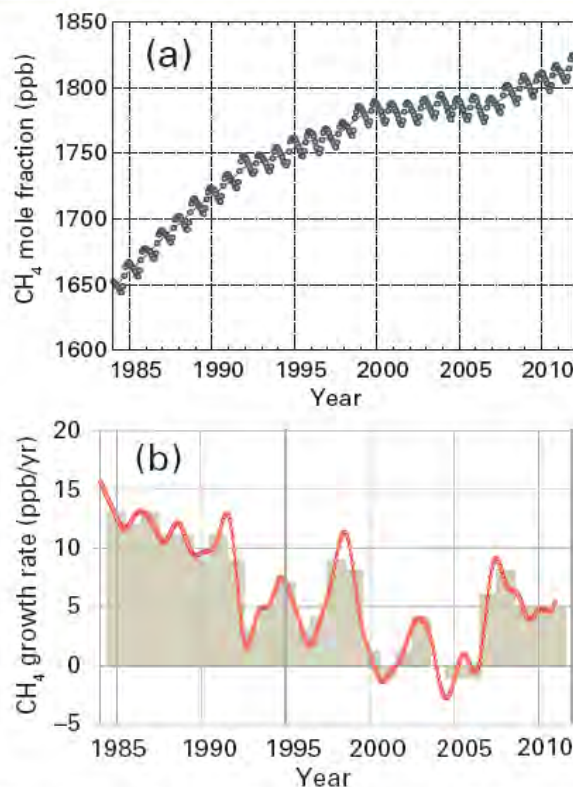


Figure 4. Globally averaged CH₄ mole fraction (a) and its growth rate (b) from 1984 to 2011. Annually averaged growth rate is shown by columns at (b).

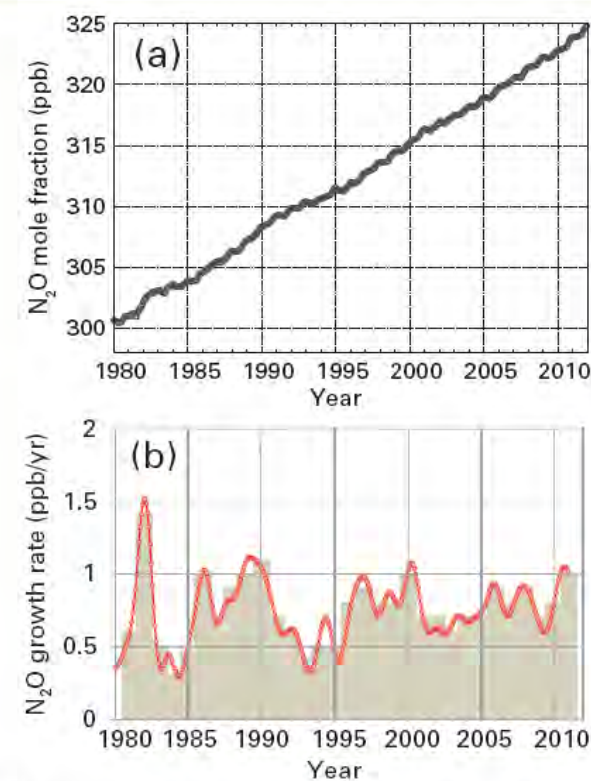


Figure 5. Globally averaged N₂O mole fraction (a) and its growth rate (b) from 1980 to 2011. Annually averaged growth rate is shown by columns at (b).

Поступление соединений азота в почву в мире

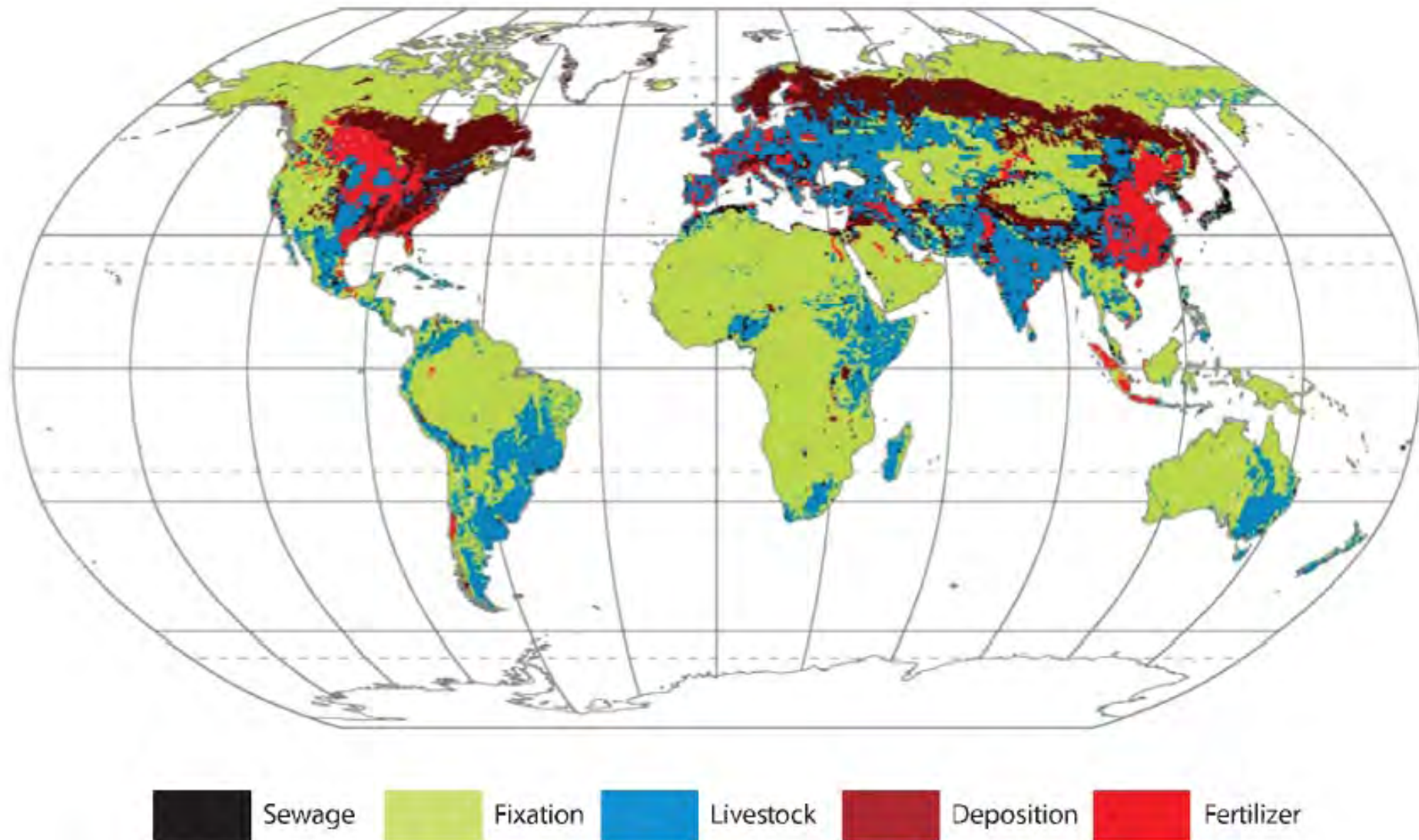
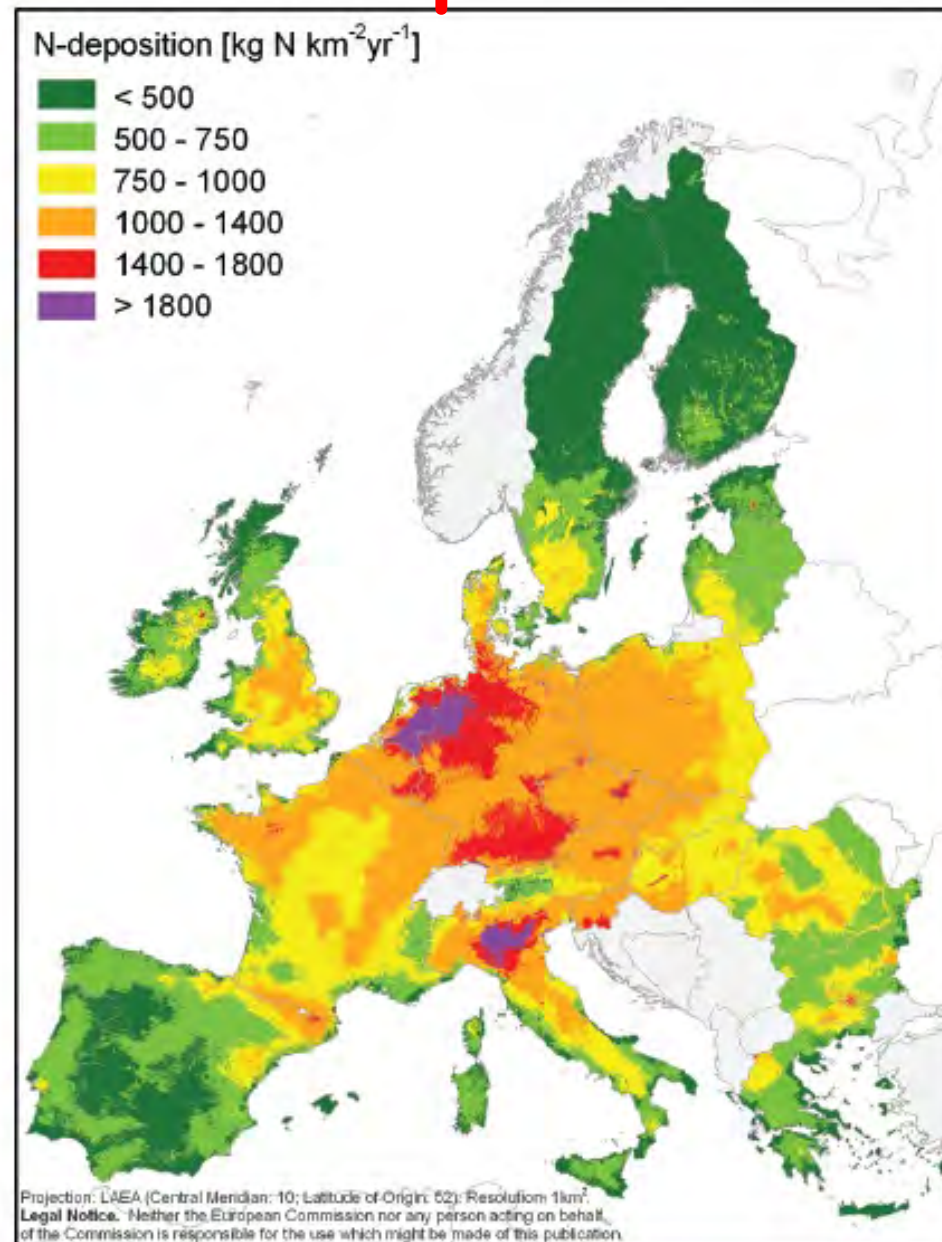
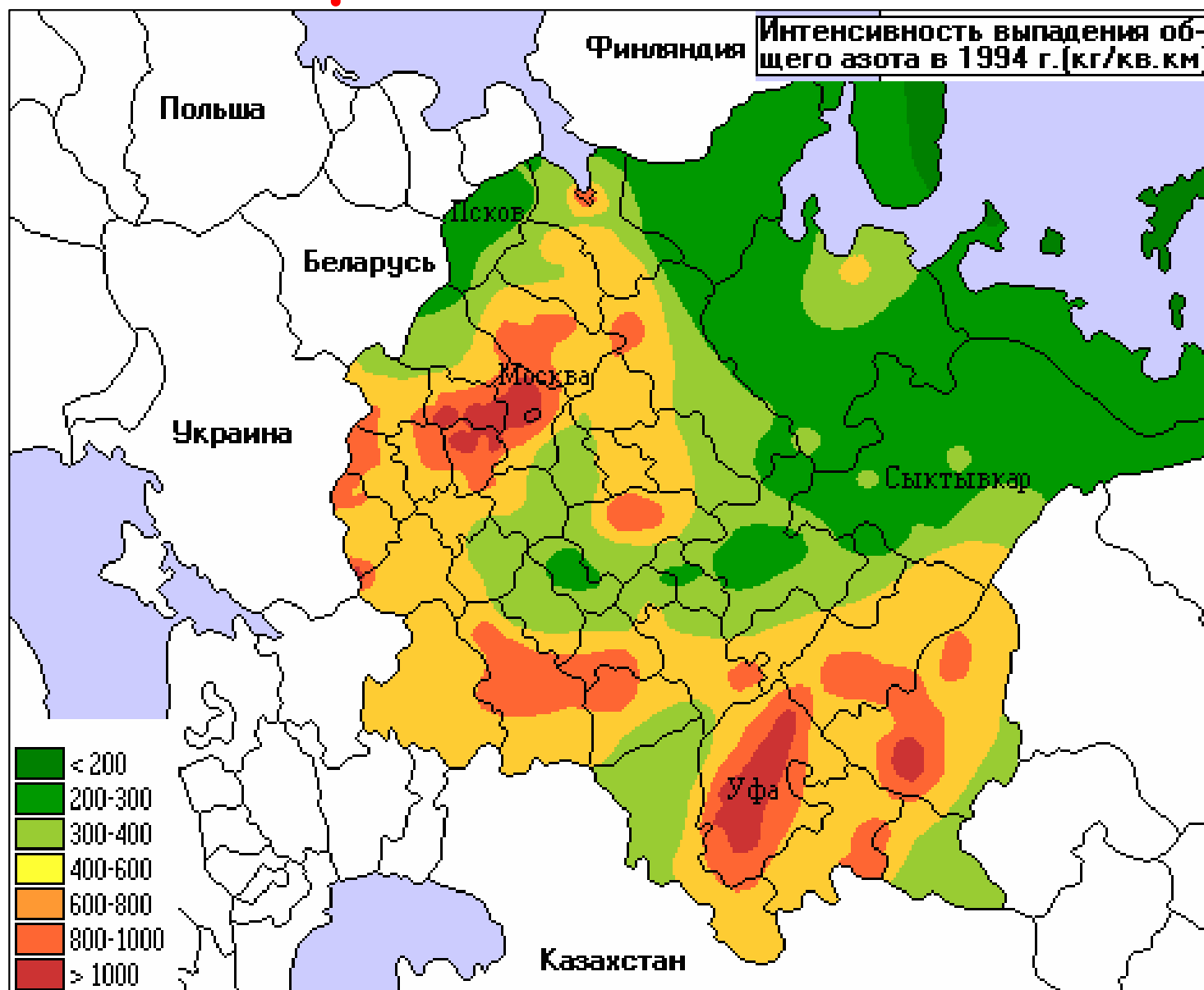


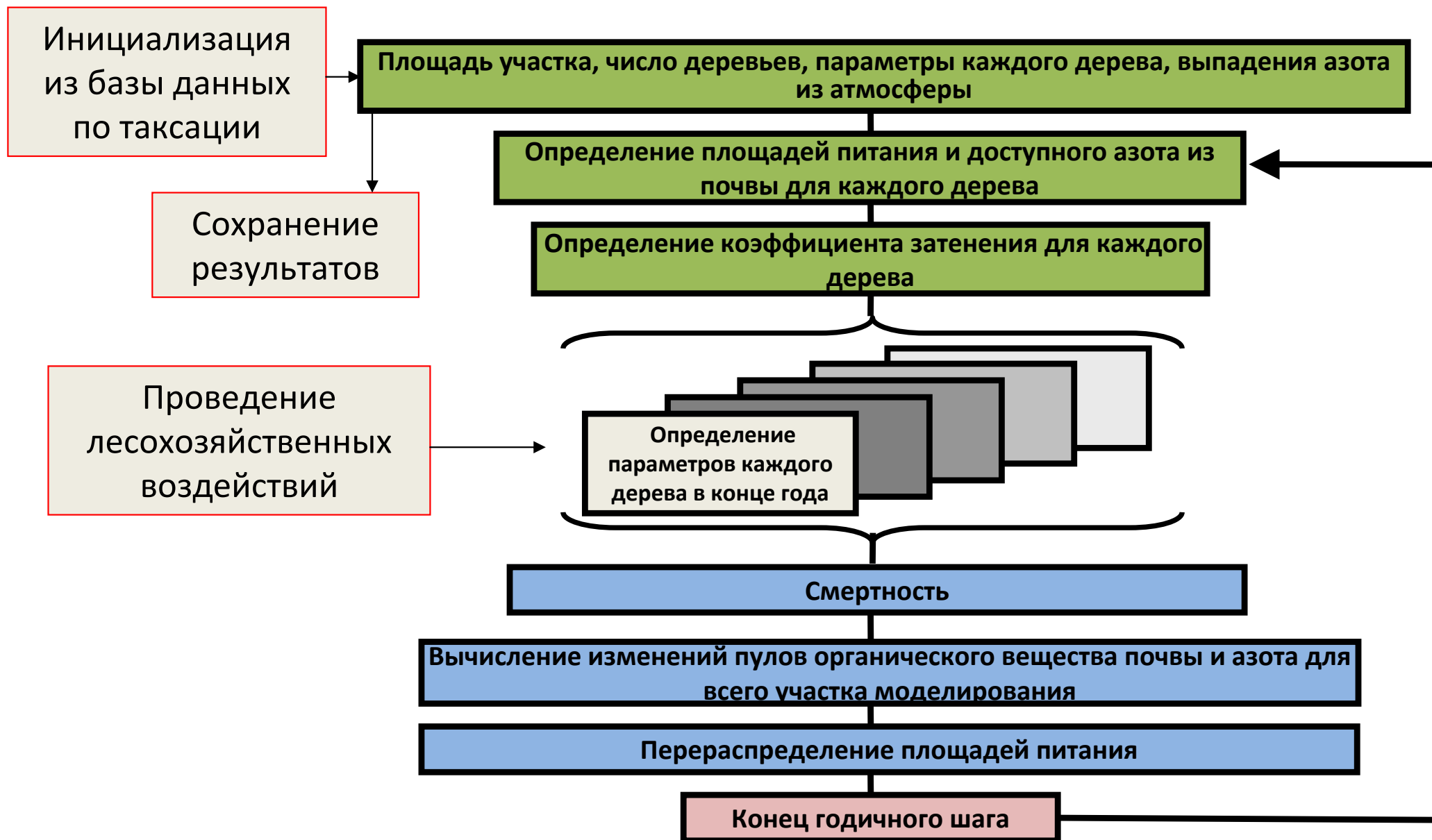
Figure 2.13 Nitrogen loading onto the land mass and aquatic systems as a source for delivery to the coastal zone; a measure of potential water pollution. Total and inorganic nitrogen loads as deposition, fixation, fertilizer, livestock loads, human loads and total distributed nitrogen to the land and aquatic system. Map prepared by Water Systems Analysis Group, University of New Hampshire.

Поступление соединений азота в почву в Европе



Поступление соединений азота в почву в Европейской России





Алгоритм работы системы моделей EFIMOD

Подробное описание - см. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах [отв. ред. В.Н. Кудеяров]. М.: Наука, 2007. – 380 с.

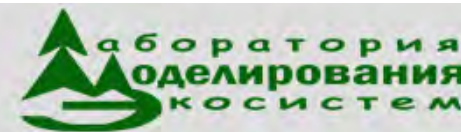
Модельные объекты: 1 – Данковское лесничество (Московская область), 2 – Мантуровское лесничество (Костромская область), 3 – Железнодорожное лесничество (Республика Коми)



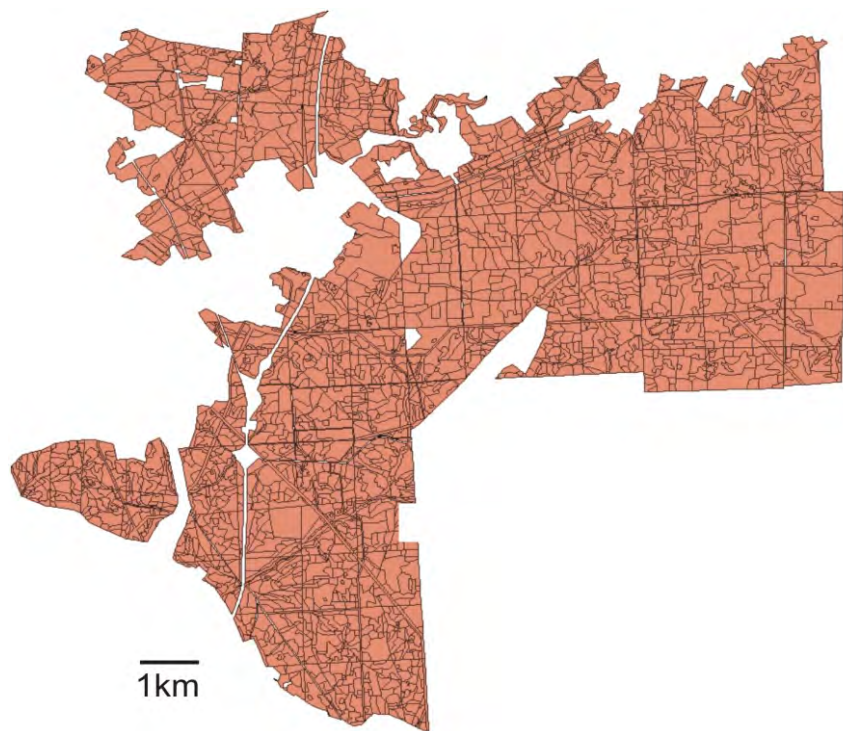
(Komarov, Shanin, Biogeoscience, 2012)



**Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН**



Характеристика объектов



Данковское лесничество
Московская область

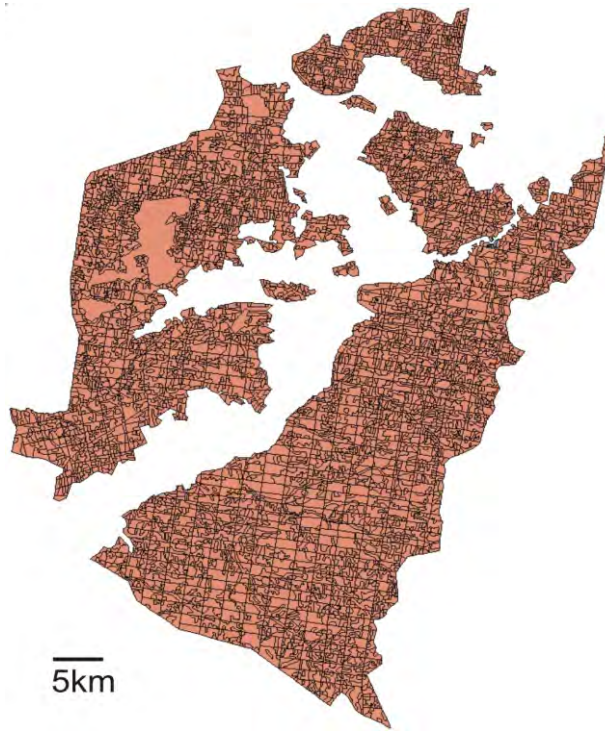
2200 выделов

66000 га

Сумма осадков: **491 мм**

Средняя температура:

3.7°C



Мантуровское
лесничество
Костромская область

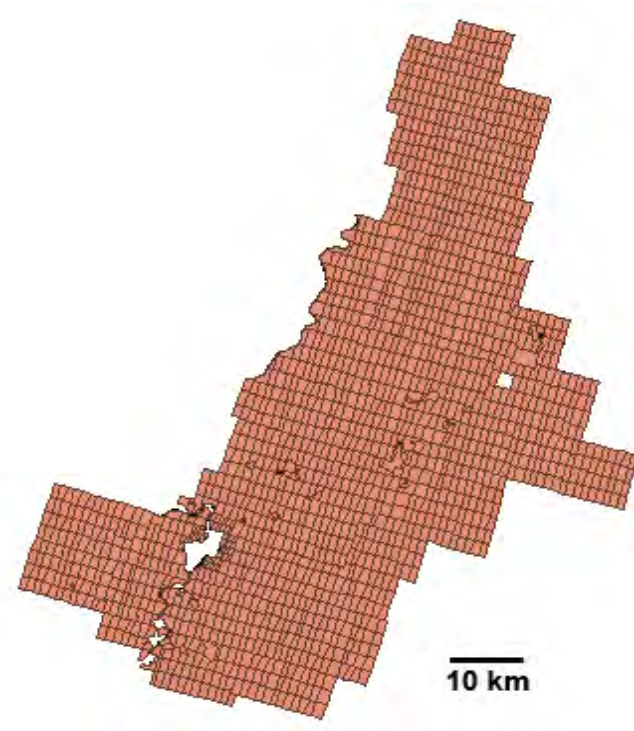
21637 выделов

180600 га

Сумма осадков: **633 мм**

Средняя температура:

2.3°C



Железнодорожное
лесничество
Республика Коми

57791 выделов

1195000 га

Сумма осадков: **693 мм**

Средняя температура:

0.1°C

Сценарии моделирования

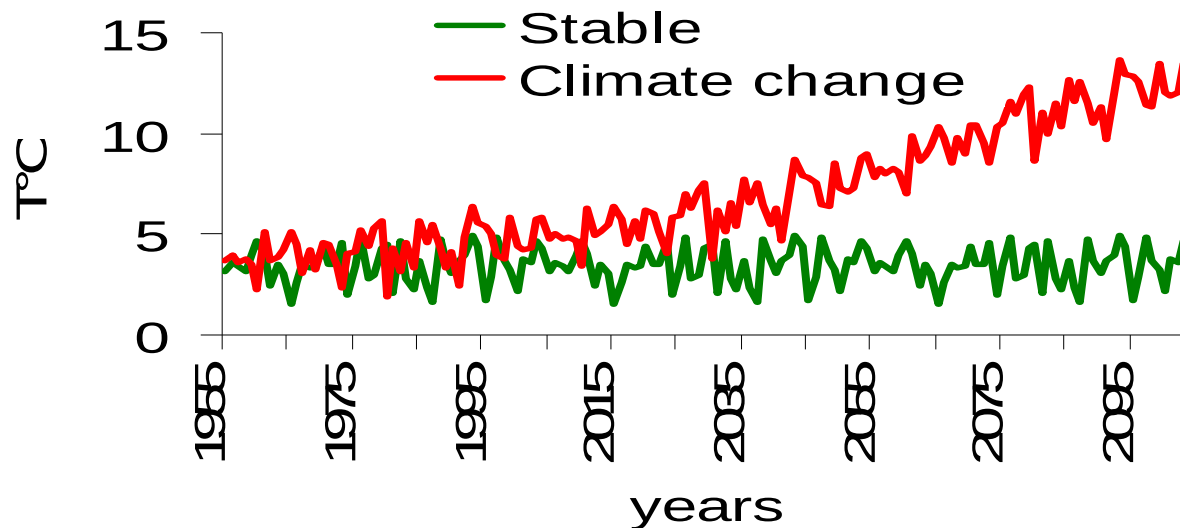
Управление:

без воздействий,
естественное
возобновление каждые 15
лет ($1000 \text{ деревьев га}^{-1}$)

Азотные выпадения:

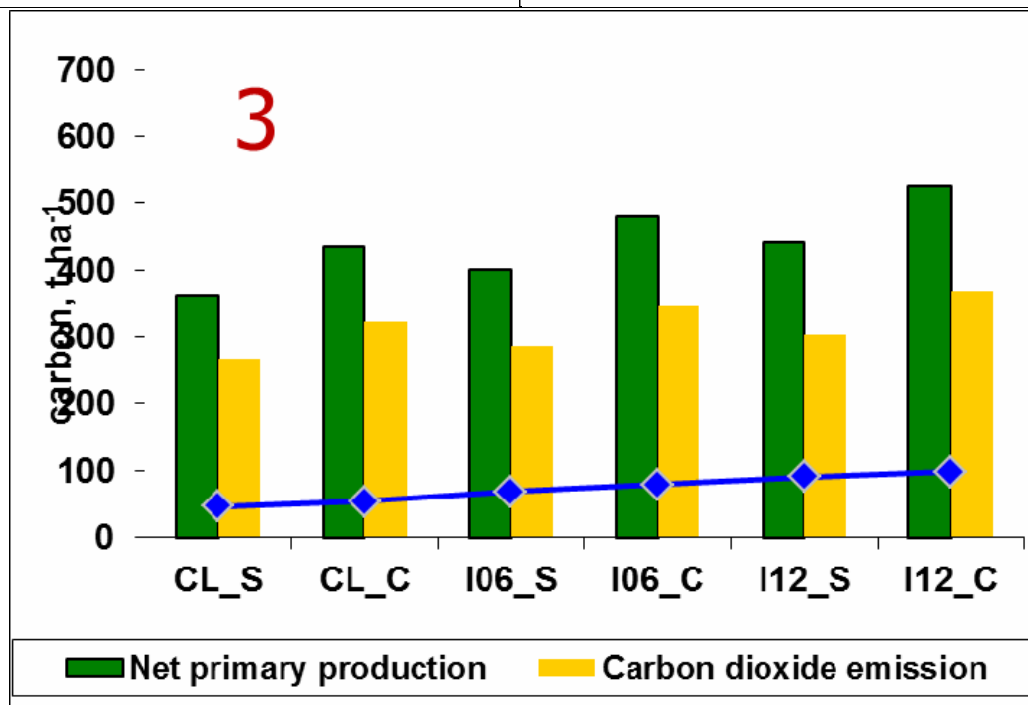
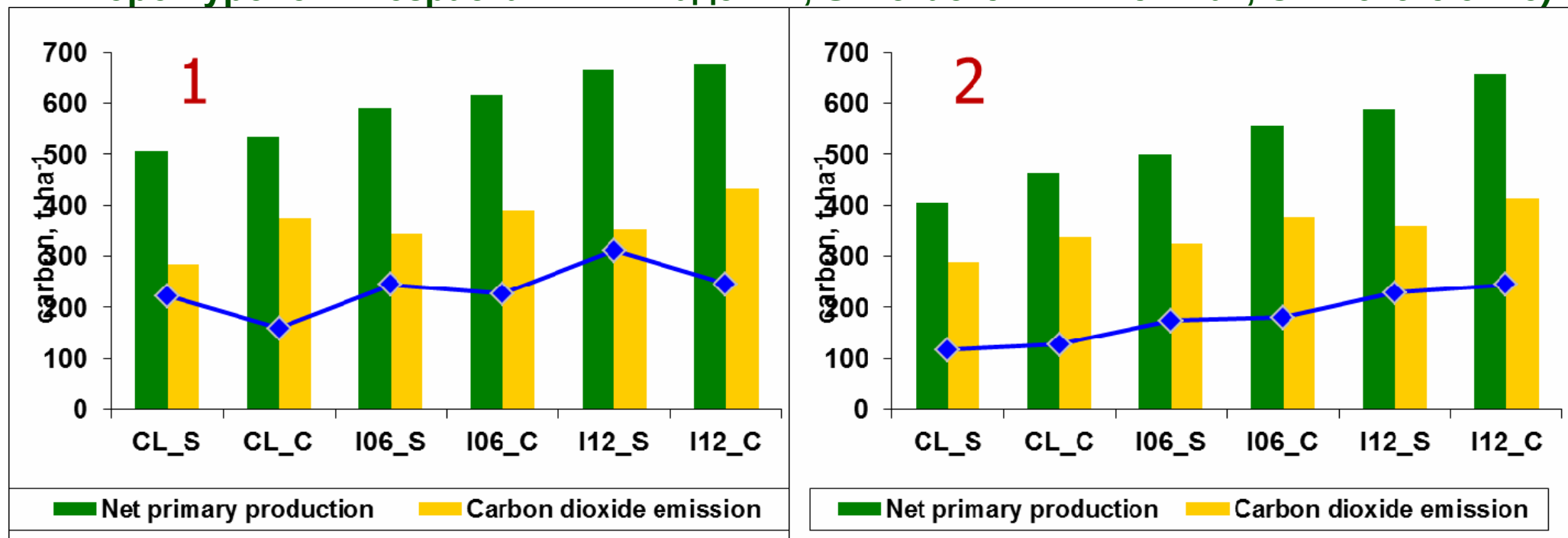
1. Текущий уровень
2. 6 кг га^{-1} в год возрастание
3. 12 кг га^{-1} в год

Климатические сценарии



HadCM3 модель, A2 сценарий (IPCC, 2000)

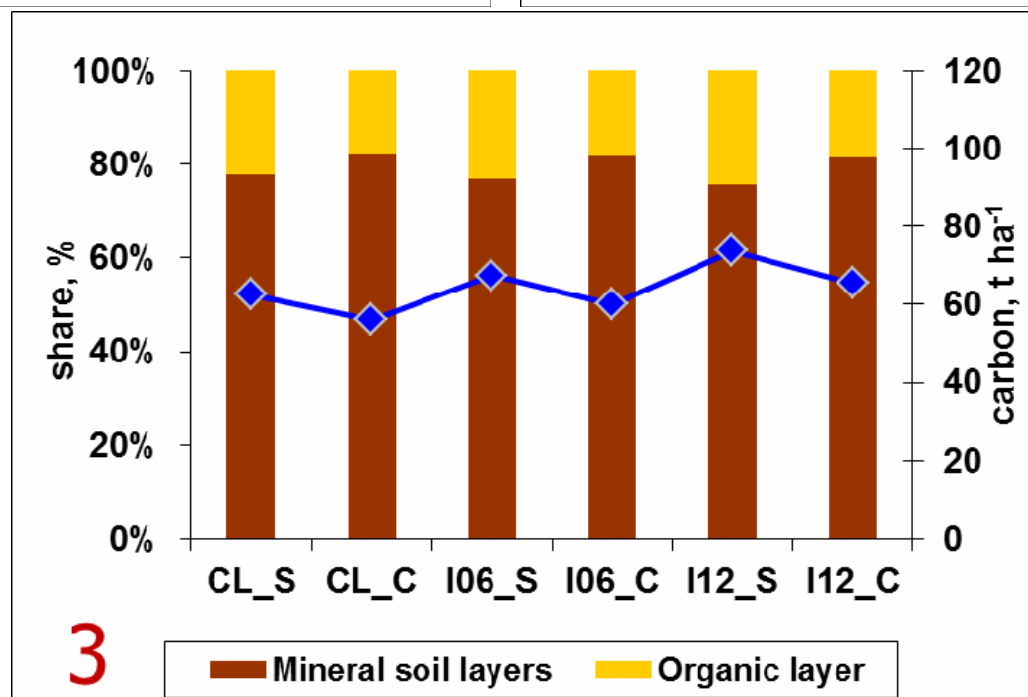
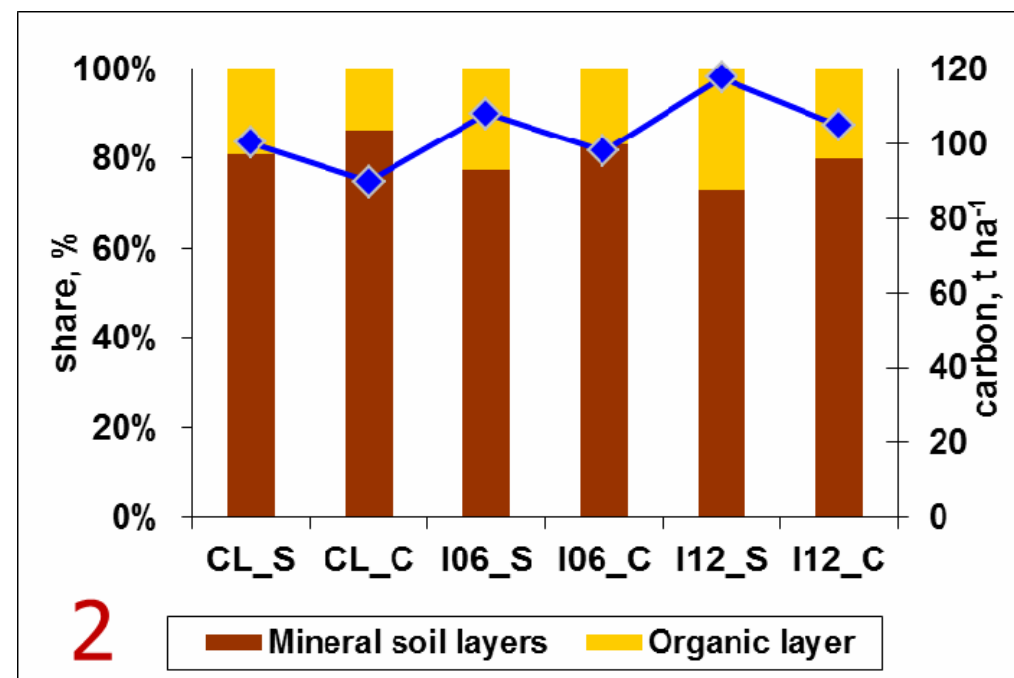
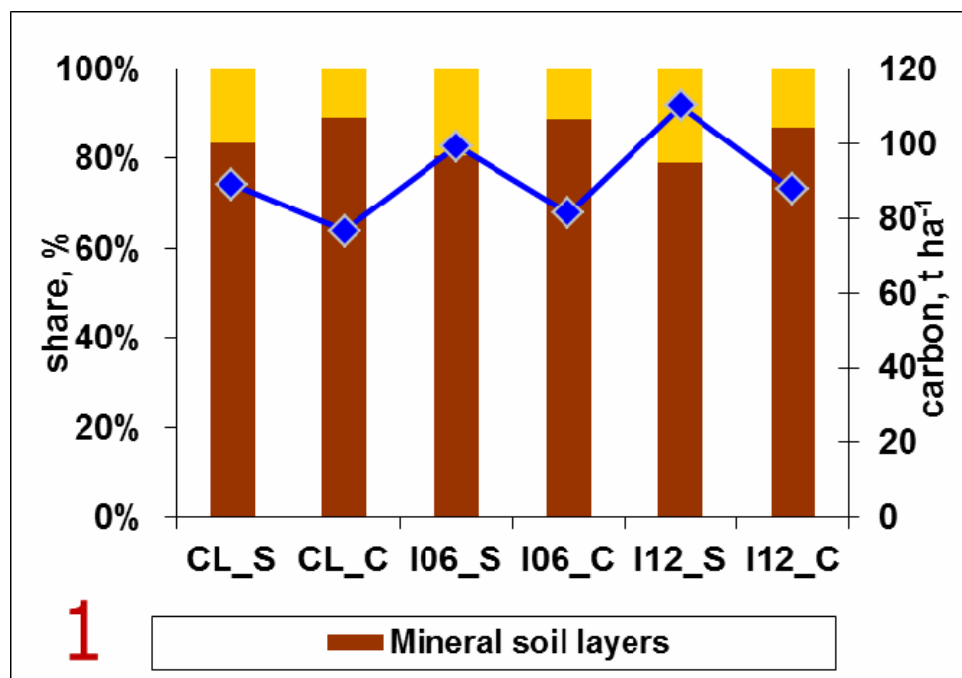
Баланс углерода при различных уровнях выпадений азота и климатических изменениях (CL – текущий уровень, i06 – первый уровень возрастания выпадений, i12 – второй уровень возрастания выпадений; S – стабильный климат, C – потепление)



**Аккумуляция углерода (NEP), кг [C] га⁻¹ в год на 1 кг [N] га⁻¹ в год
при разных уровнях выпадений азота
(CL – текущий уровень, I06 – возрастание на 6 кг [N] га⁻¹ в год, I12 –
возрастание на 12 кг [N] га⁻¹ в год)
и климатических сценариях (_S – стабильный климат, _C –
потепление)**

Лесная территория	CL_S	CL_C	I06_S	I06_C	I12_S	I12_C
Данковское	30.9	22.4	18.6	17.1	16.2	12.8
Мантуровское	16.2	17.8	13.2	13.7	11.9	12.7
Железнодорожное	9.6	11.1	6.3	7.3	5.4	5.7

Запасы углерода в органических и минеральных горизонтах почвы при разных уровнях выпадений азота и климатических сценариях (CL – текущий уровень, i06 – первый уровень возрастания, i12 – второй уровень возрастания; S – стабильный климат, C – потепление)



Современное состояние и дальнейшее развитие

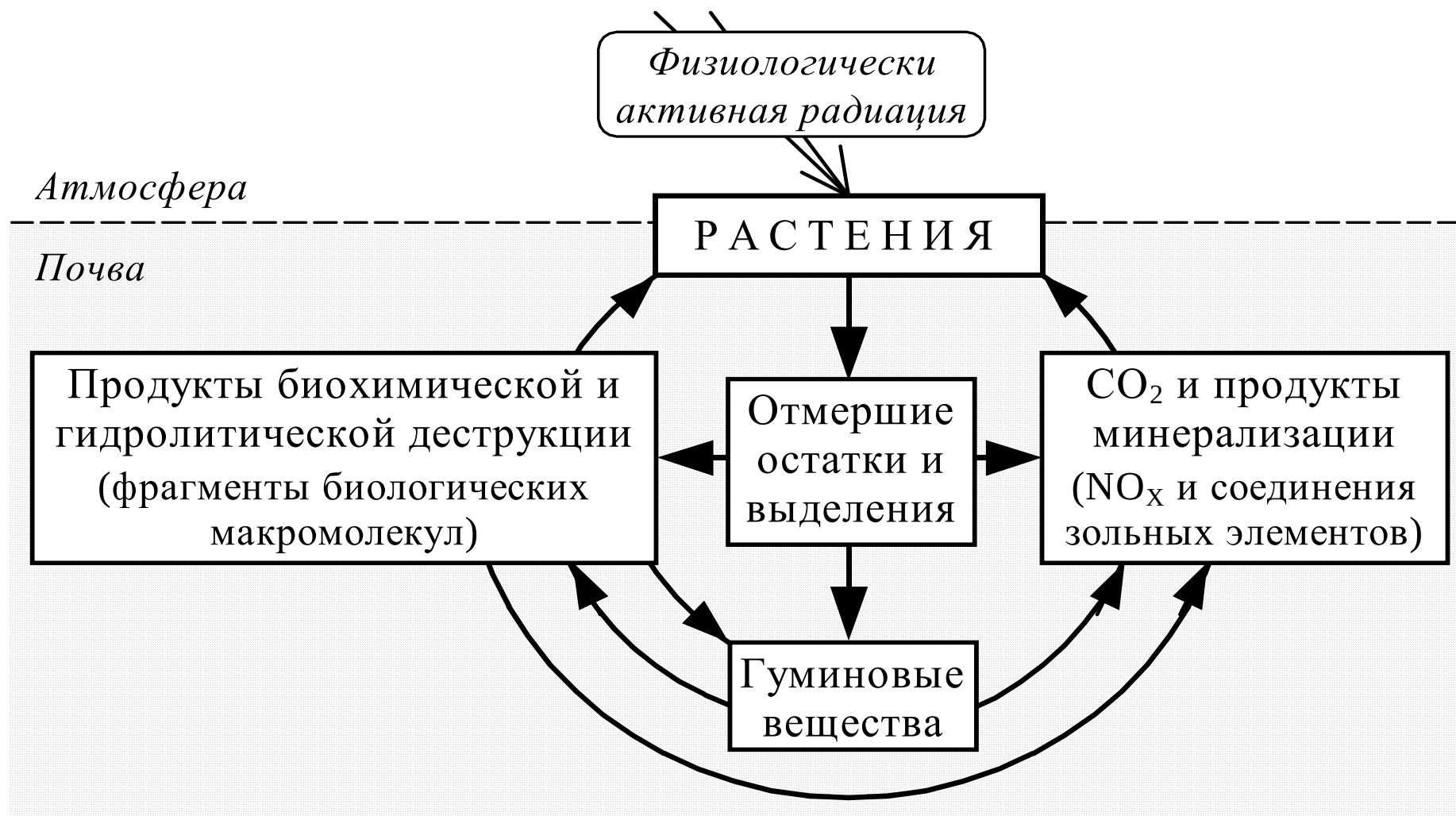
- Усовершенствование экосистемной модели роста леса как симулятора опадов для почвенной модели (более точное описание конкурентных взаимоотношений между деревьями, перераспределение по органам, параметризация новых
- Построение модели динамики биомассы живого напочвенного покрова
- Более точный учет питательного статуса деревьев, введение описания круговорота элементов в зависимости от типа леса и климатической зоны
- Развитие модели ROMULSolute для описания выщелачивания элементов из почвенного профиля
- Включение в экосистемную модель подмодели разложения крупных растительных остатков

Спасибо за внимание!

The END 

Продолжение следует...

Биогеохимический круговорот углерода



Подходы к моделированию динамики ОрВТТ:

- Предположение об разложении ОрВТТ как о процессах микробиологического разложения только (CENTURY (Parton et al., 1987; CBM-CFS2 (Kurz and Apps, 1999; FLDM (Zhang et al., 2007); CANDY (Franko et al., 1995) и т.д..
- Учет различного химического состава фракций ОрВТТ, которые разлагаются с разной скоростью (MBL-GEN (Rastetter et al., 1991) DOCMOD (Currie and Aber, 1997; YASSO (Liski et al., 2005)
- Сукцессионные стадии разложения как результат деятельности разных групп педобионтов (ROMUL)

Indices of soil horizons in ROMUL

		Russian taxonomy		International taxonomy	
		Previous	Recent*	Previous	Recent**
	Undecomposed plant litter	O1	Excluded	L	OL
	Partially decomposed organic material, fermentation layer	O2	O for all organic layer***	F	OF
	Decomposed organic layer, humified forest floor	O3		H	OH
	Humus horizon of mineral topsoil	A1	A (AOAH,AJ,AY etc.)	Ah	A, AE
	Eluvial horizon, often as podzol horizon	A2	E	E	E
	Illuvial horizon	B	B (BMF, BFM etc.)	B	B

Notes:

- * There is a great number indices for transitional and specific horizons as a combination of basic indices
- ** These basic indices have a great number of subscript indices showing various specific features of basic ones
- *** There are some other indices for organic layers of different kind without their sub division

Some horizons can absent in describing soil profile

Коэффициенты ($\pm SE$), оцененные по экспериментальным данным

Litter type	k_1	k_2	k_3
Ryegrass	0.0227 ± 0.0027	0.00244 ± 0.00038	0.0254 ± 0.0063
Oak leaves	0.0081 ± 0.0010	0.00108 ± 0.00021	0.0212 ± 0.0057
Oak bark	0.0022 ± 0.0004	0.00091 ± 0.00024	0.0135 ± 0.0104
Ferns	0.0121 ± 0.0011	0.00047 ± 0.00014	0.0263 ± 0.0042
Green mosses	0.0091 ± 0.0012	0.00028 ± 0.00017	0.0240 ± 0.0054
Sphagnum	0.0096 ± 0.0010	0.00036 ± 0.00008	0.0373 ± 0.0061
Pine needles	0.0027 ± 0.00005	0.00048 ± 0.00012	0.0051 ± 0.0007
Pine thin branches	0.0018 ± 0.00003	0.00042 ± 0.00002	0.0095 ± 0.0005
Pine cones	0.0008 ± 0.00001	0.00026 ± 0.00003	0.0053 ± 0.0008
Roots <2 mm	0.0145 ± 0.00034	0.00147 ± 0.00003	0.0296 ± 0.0012
Roots 2-10 mm	0.0075 ± 0.00012	0.00213 ± 0.00004	0.0148 ± 0.0007
Roots 10-20 mm	0.0033 ± 0.00007	0.00092 ± 0.00022	0.0041 ± 0.0009

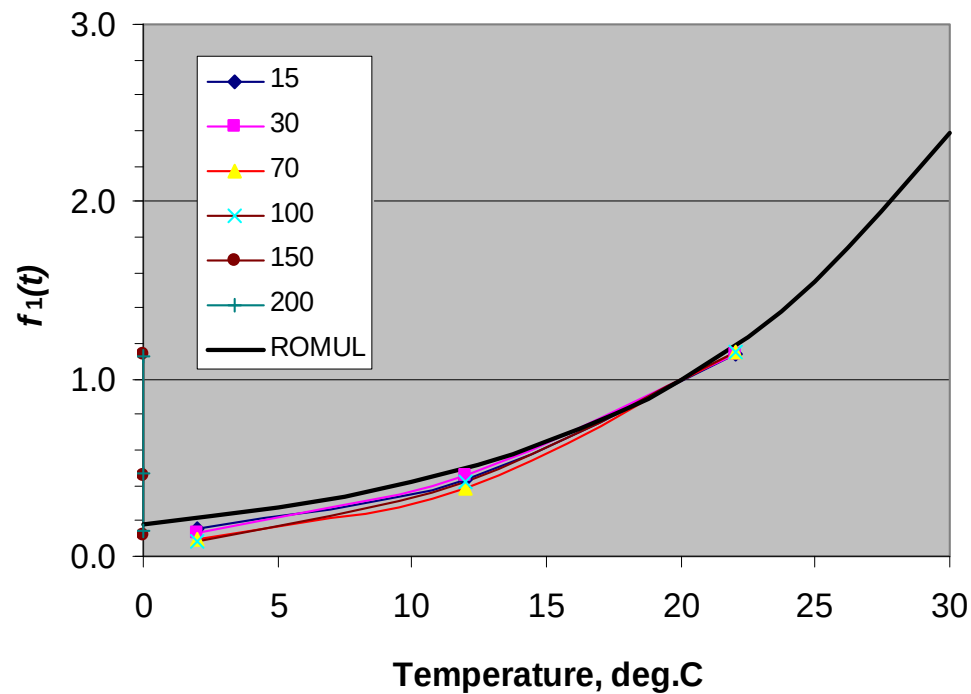
Main assumptions

We believe that first approach applies well for slow changes using spin-up and steady-state assumptions. A problem of including dynamics of other elements into general scheme with possibility of using rates parameters of general SOM dynamics exists

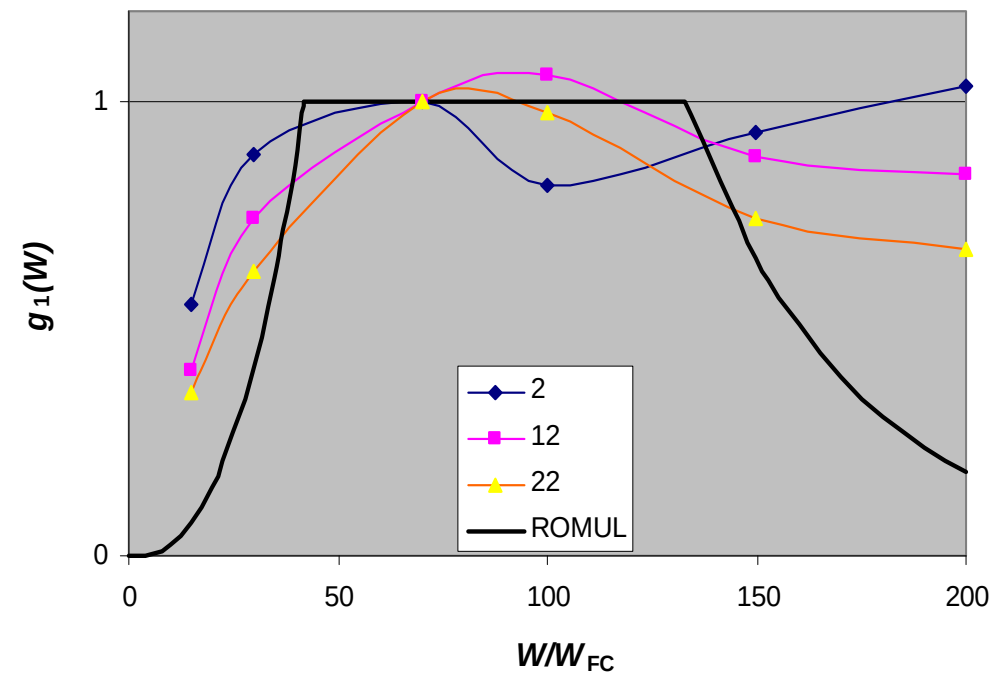
To simplify modelling we made an attempt to use the model of soil organic matter and soil nitrogen dynamics ROMUL as a basis for evaluating of rates of different compartments of soil organic matter transformation. We assume, for example, that calcium dynamics follows this transformation, but differs in coefficients' values. The difference can be expressed as corrections to the ROMUL coefficients which we can evaluate using experimental data obtained from sites which can be considered as being in steady state.

Зависимости коэффициентов от температуры и влажности почвы

$f_1(t)$ under different moistures



$g_1(W)$ under different temperatures



**Климатические и гидрологические данные,
необходимые для работы модели**

Климатические параметры

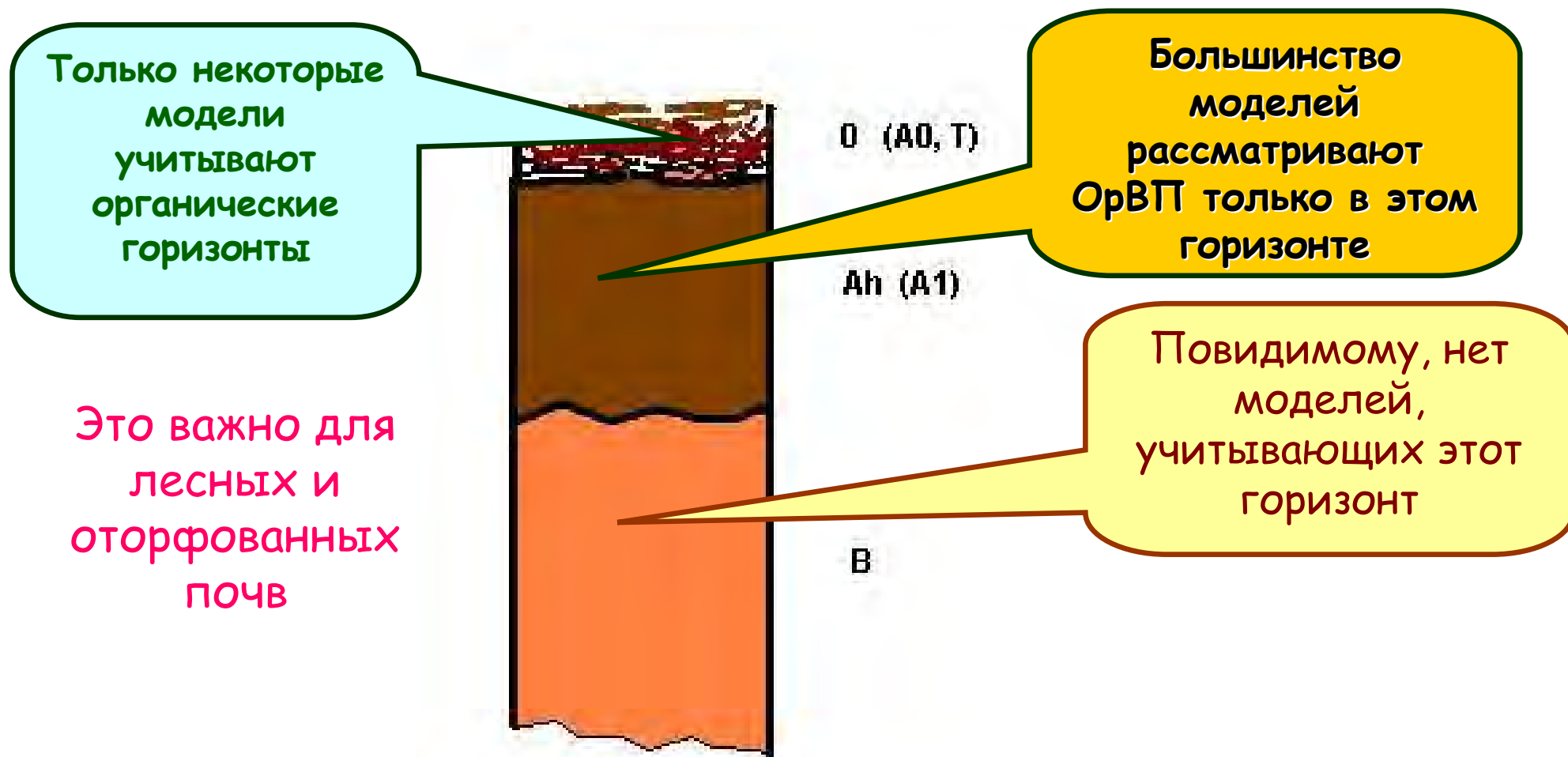
**Долговременные ряды
среднемесячных температур воздуха,
осадков
(если возможно) температуры почвы (на глубине 20 см)**

Гидрологические параметры:

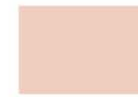
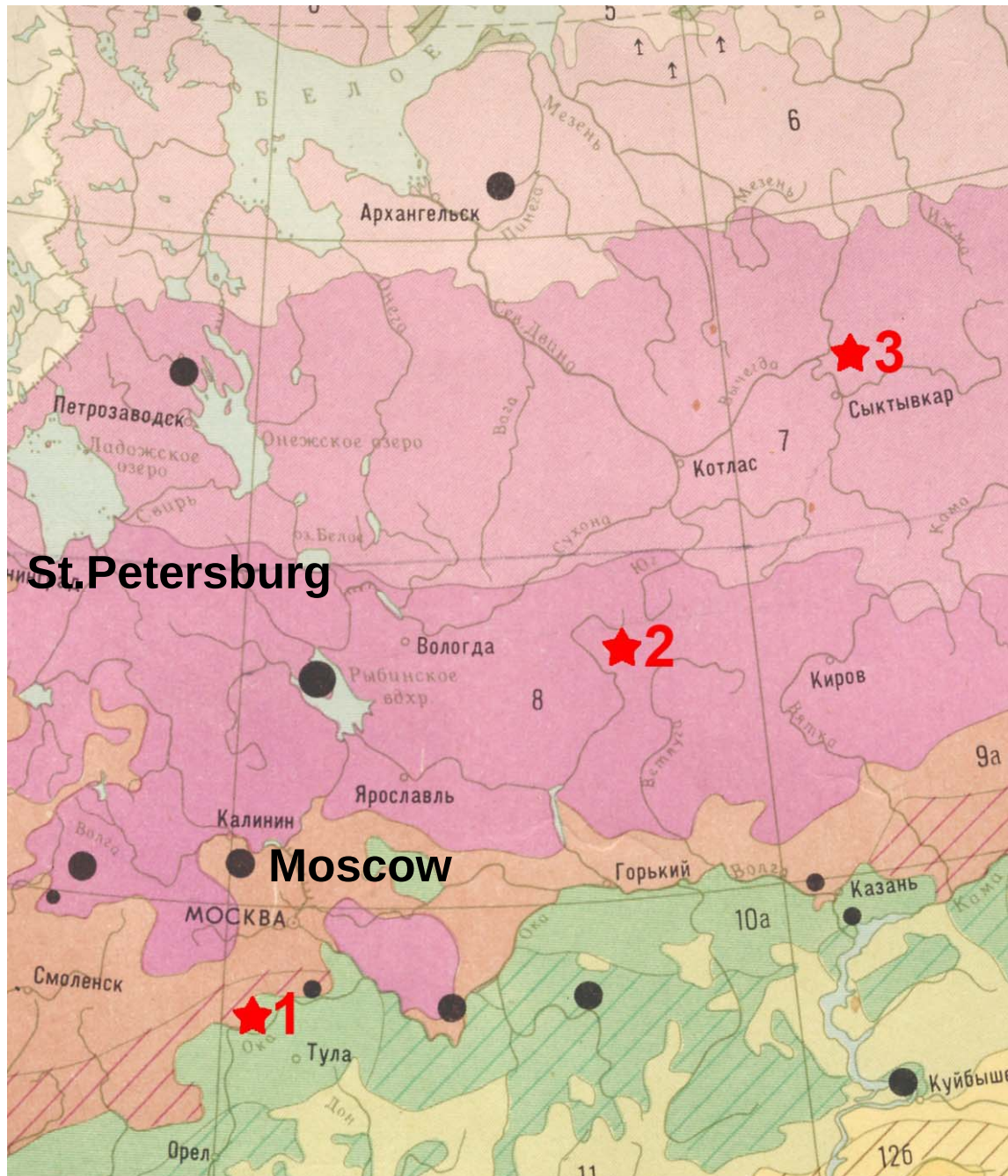
**плотность почвы,
влажность завядания,
полевая влагоемкость,
полная полевая влагоемкость**

**Запасы органического вещества и азота в следующих почвенных пулах:
неразложившаяся подстилка,
сухостой,
валеж,
органическое вещество лесной подстилки,
лабильный гумус минеральных горизонтов почвы,
стабильный гумус минеральных горизонтов**

Представление почвенного профиля в современных моделях динамики органического вещества почвы (OrVTP)



Areas under study: 1 – Danki forest enterprise (Moscow region), 2 – Manturovo forest enterprise (Kostroma region), 3 – Zheleznodorozhny forest enterprise (Komi Republic)



North taiga



Middle taiga



South taiga

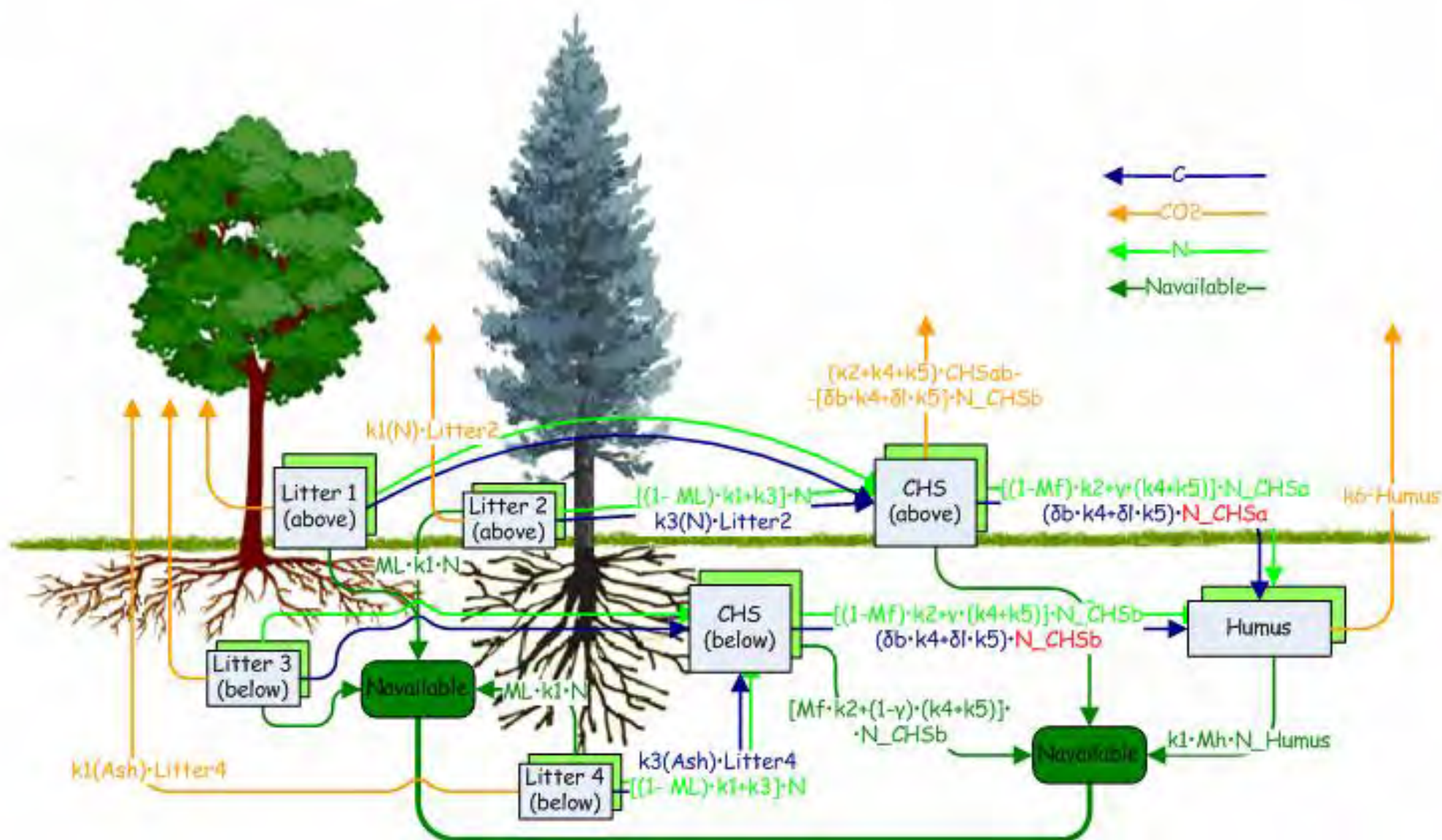


Subboreal



**Temperate mixed
forests**

Основные процессы в модели ROMUL



**Different groups of tree species by the end of simulation
at different levels of nitrogen deposition and climate changes
(CL – current level, i06 – first increased level, i12 – second increased level;
S – stable climate, C – climate change)**

