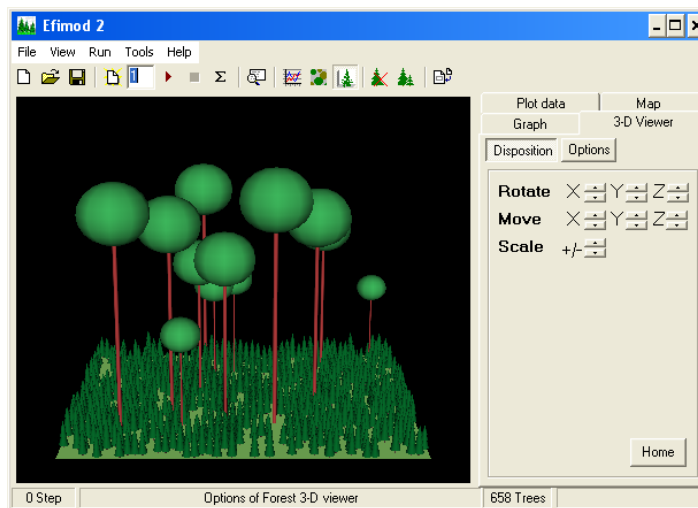




# Научная тема 4.1 Развитие методов моделирования лесных экосистем

*Грбарник Павел Яковлевич*  
Лаборатория моделирования экосистем  
ИФХиБППТ РАН, Пущино



# Планируемые мероприятия

1. Разработка сценариев для описания основных нарушающих воздействий природных и антропогенных факторов: изменение климата, рост загрязнения атмосферы, рубки, пожары, массовые ветровалы, вспышки численности фитопатогенов
2. Модификация базовой экосистемной модели EFIMOD.  
Совершенствование модели продукционного процесса и модели водно-теплового режима почвы для более полного учета воздействий, связанных с изменениями факторов среды
3. Модельные прогнозы динамики лесных экосистем на ключевых территориях и верификация модели лесных экосистем

# Система моделей EFIMOD

**EFIMOD – система имитационных моделей лесной экосистемы, описывающая круговорот азота и углерода, рост и конкуренцию между деревьями в смешанных древостоях**

**Система моделей EFIMOD комбинирует *процессный и индивидуально-ориентированные* подходы в моделировании экосистем и позволяет проводить кратко- и долгосрочные имитации параметров экосистем на локальном и региональном уровнях.**

**Теоретической основой EFIMOD является концепция «экосистемы одного растения» для расчета продукции *биомассы* дерева и *динамики органического вещества* почвы в их взаимодействии на основе *стехиометрических соотношений***



## Типы моделей

❖ Лесоводственные (growth simulators):

MOTTI, FIBER, SILVA, ...

❖ Лесоводственные ресурсные:

CBM-CFS, EFISCEN, SaMARE ...

❖ Гэп-модели/экофизиологические кагортные :

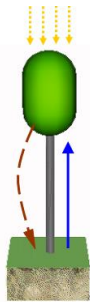
JABOWA, TRIPLEX, PICUS, FORRUS, SORTIE, ...

❖ Комбинированные: EFIMOD

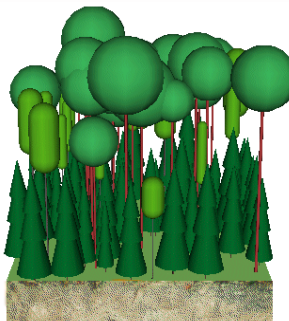
# EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

Основные компоненты системы :

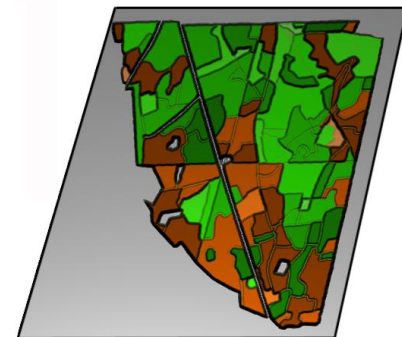
- ✓ модель роста индивидуального дерева
- ✓ популяционный модуль древостоя (модель конкурентного взаимодействия деревьев)
- ✓ модель динамики органического вещества почвы ROMUL
- ✓ имитатор почвенного климата SCLISS
- ✓ модуль возобновления
- ✓ модуль лесохозяйственных мероприятий
- ✓ модуль лесных пожаров



**Моделирование роста  
одного дерева**



**Моделирование  
древостоя**



**Моделирование  
системы выделов**

# EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

## Модель прироста биомассы отдельного дерева

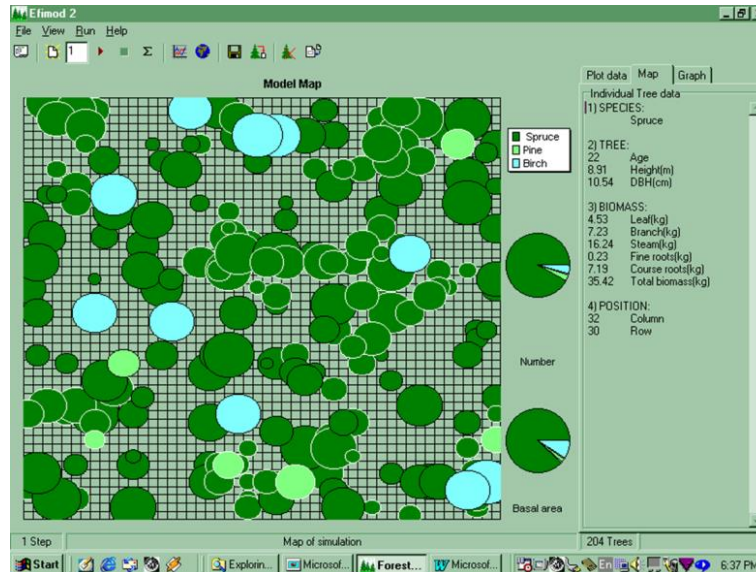
- ❖ дерево состоит из отдельных компонентов: листва/хвоя, ствол, ветви, структурные корни, тонкие корни;
- ❖ прирост биомассы зависит от освещенности и пула доступных соединений азота;
- ❖ потребление азота, реакция на затенение, распределение прироста по органам видоспецифичны.



## EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

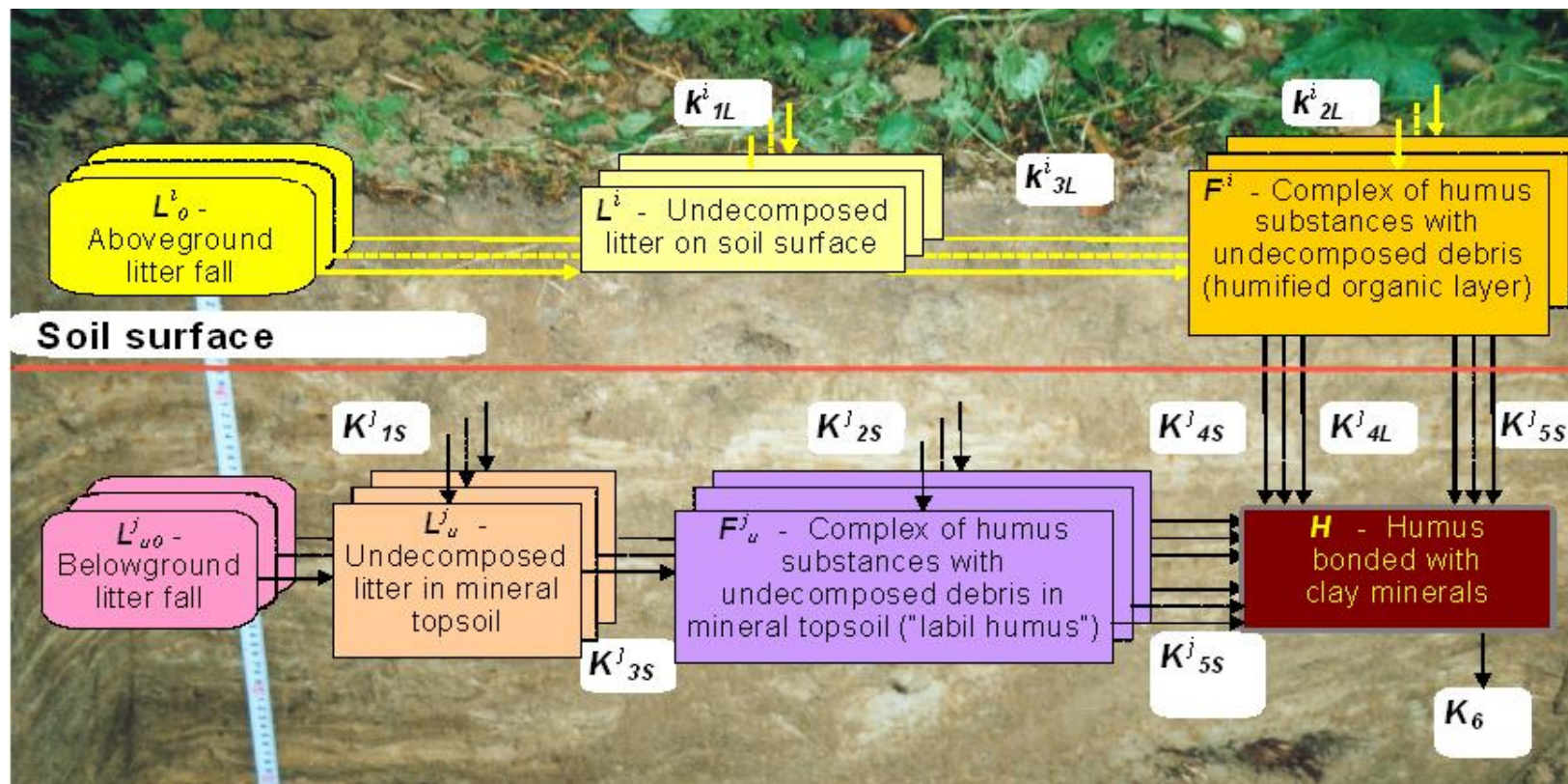
Пространственная модель древостоя основана на расчете зоны затенения и корневого питания, которые зависят от размеров дерева (высоты и диаметра соответственно).

Ограничение доступных ресурсов вследствие конкуренции редуцирует продуктивность индивидуальных деревьев.



## EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

Модель динамики органического вещества почвы ROMUL (Chertov et al., 2001) описывает разложение и гумификацию растительного опада, поступающего на/в почву и динамику азота, доступного для растений в органических и минеральных горизонтах почв.





## **EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения**

- **Статистический имитатор климата почвы SCLISS** (Быховец, Комаров, 2002) позволяет оценивать температуру и влажность почвы по рядам стандартных метеорологических данных (температуре воздуха и осадкам) месячного разрешения, а в случае необходимости - генерировать сами эти ряды по заданным статистическим параметрам.

### **SCLISS состоит из**

- а) генератора «входных» метеорологических данных**
- б) подмодели температуры почвы**
- в) подмодели влажности почвы**

# EFIMOD: реализованный спектр модельных сценариев

- **Влияние разных типов рубок и лесохозяйственных мероприятий**
  - Chertov O.G., Komarov A.S., Kolstrom M., Pitkanen S., et al. // *Forest Ecology and Management*, 2003:
  - Chertov O.G., Komarov A.S., Lukianov A.M., Mikhailov A.V. et al. // *Forest Ecology and Management*, 2006: .
  - Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В. и др. // *Математическая биология и биоинформатика*, 2015,
  - Shanin V., Valkonen S., Grabarnik P., Mäkipää R. // *Forest Ecology and Management*, 2016.
- **Прогноз влияния климатических изменений**
  - Chertov O.G., Bhatti J., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. // *Forest Ecology and Management*, 2009:
  - Шанин В.Н., Михайлов А.В., Быховец С.С., Комаров А.С. // *Изв. РАН, сер. Биол.*, 2010,.
  - Shanin V., Komarov A., Khoraskina Y., Bykhovets S. et al. // *Ecological Modelling*, 2013: 251.
- **Прогноз влияния внешних катастрофических воздействий (лесных пожаров и др.).**
  - Комаров А.С., Кубасова Т.С. // *Изв. РАН, сер. Биол.*, 2007.
  - Чертов О.Г., Комаров А.С., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Бхатти Д.С. // *Лесоведение*. 2012
- **Влияние повышенного поступления азота из атмосферы**
  - Комаров А.С., Припутина И.В., Михайлов А.В., Чертов О.Г. // *Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв*. М.: Наука, 2006.
  - Komarov A.S., Shanin V.N. // *Biogeosciences*, 2012
- **Ретроспективный анализ влияния исторических систем земледелия**
  - Bobrovsky M., Komarov A., Mikhailov A., Khanina L. // *Ecological Modelling*, 2010:
- **Моделирование изменения биоразнообразия в напочвенном покрове**
  - Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Комаров А.С., Михайлов А.В. и др. // *Лесоведение*, 2006,
- **Моделирование лесных плантаций**
  - Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В., и др. // *Математическая биология и биоинформатика*. 2015..
  - Припутина И.В., Фролова Г.Г., Шанин В.Н. // *Компьютерные исследования и моделирование*, 2016.

# Лесохозяйственные сценарии

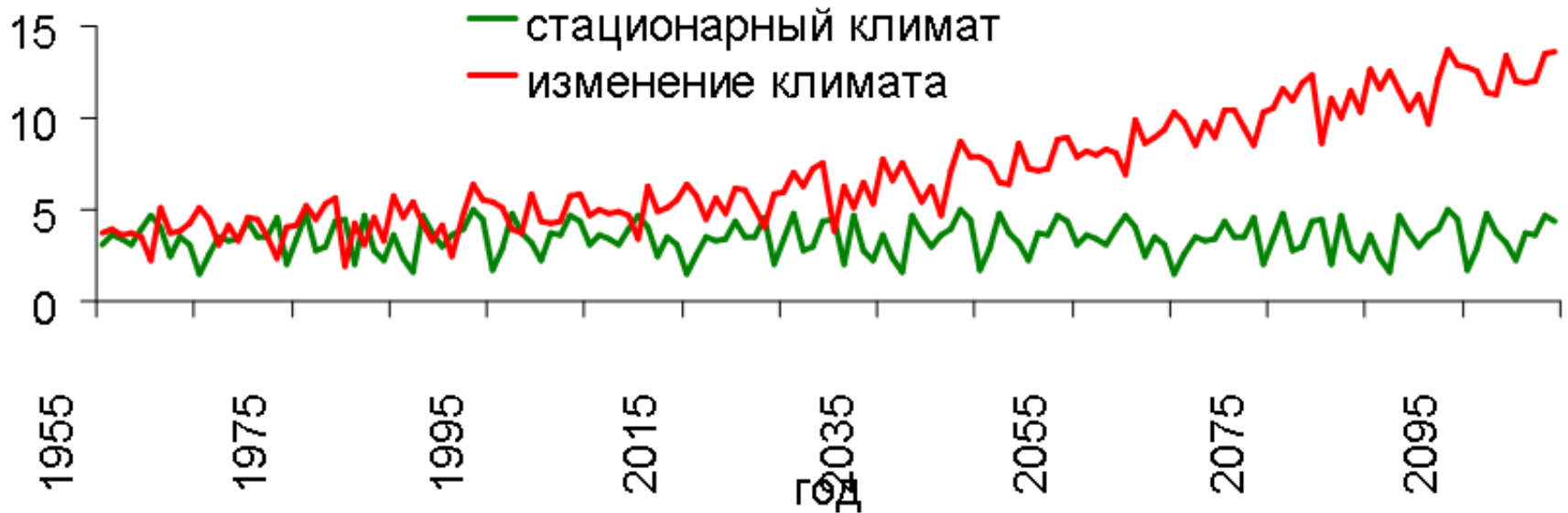
**Без воздействий (NAT):** Состав возобновления зависит от типа леса и доминанта древостоя, 1000 деревьев на гектар каждые 15 лет.

**С пожарами (FIR):** Частота пожаров:  $0.4 \pm 0.25\%$  (в год) от общей площади. Интенсивность пожаров (% сгорания соответствующего пула углерода): листва – 100%, ветви – 60%, стволы – 5%, тонкие корни – 30%, лесная подстилка – 100%, гумусовый горизонт – 25%.

**С выборочными рубками (SC):** Две рубки ухода (25 и 50 лет): 30% деревьев целевой породы (низовой метод) и 60% деревьев нецелевой породы (верховой метод). Далее следует серия выборочных рубок с изъятием 35% деревьев (по сумме площадей сечений). Возобновление – каждые 30 лет, 4000 деревьев/га, состав зависит от типа леса и доминанта древостоя.

**Со сплошными рубками (LR):** Четыре рубки ухода (5, 10, 25 и 50 лет; интенсивность зависит от достигнутой абсолютной полноты). Сплошная рубка главного пользования проводится по достижении целевой породой возраста рубки. Возобновление: через 1 год после рубки главного пользования, 5000 деревьев/га, состав зависит от типа леса и доминанта древостоя.

# Климатические сценарии

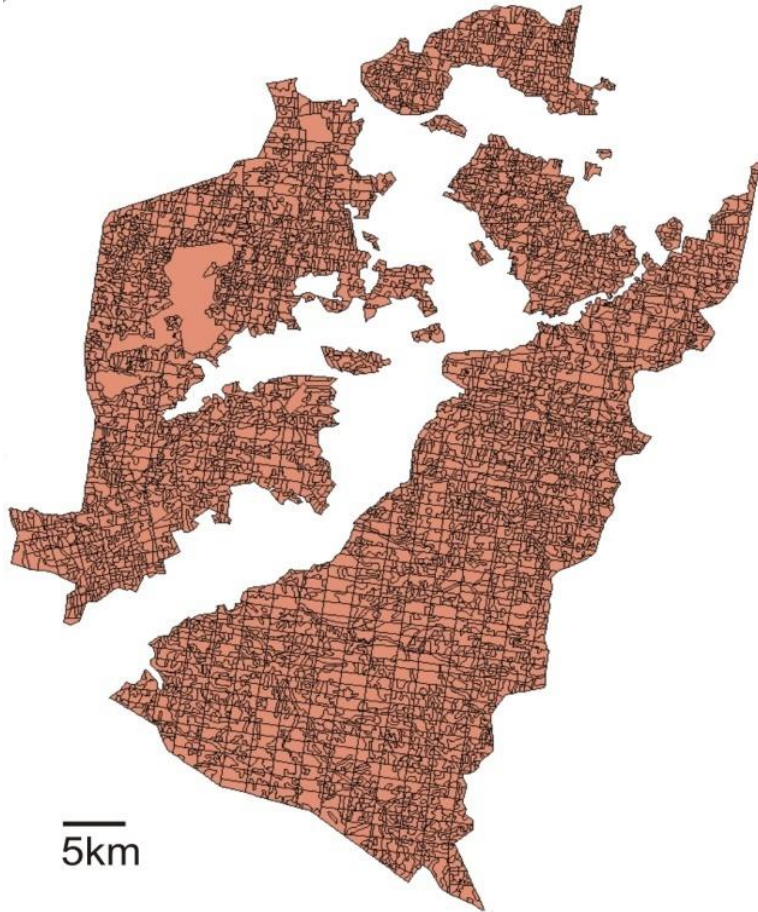


**Стационарный климат (\_S).**

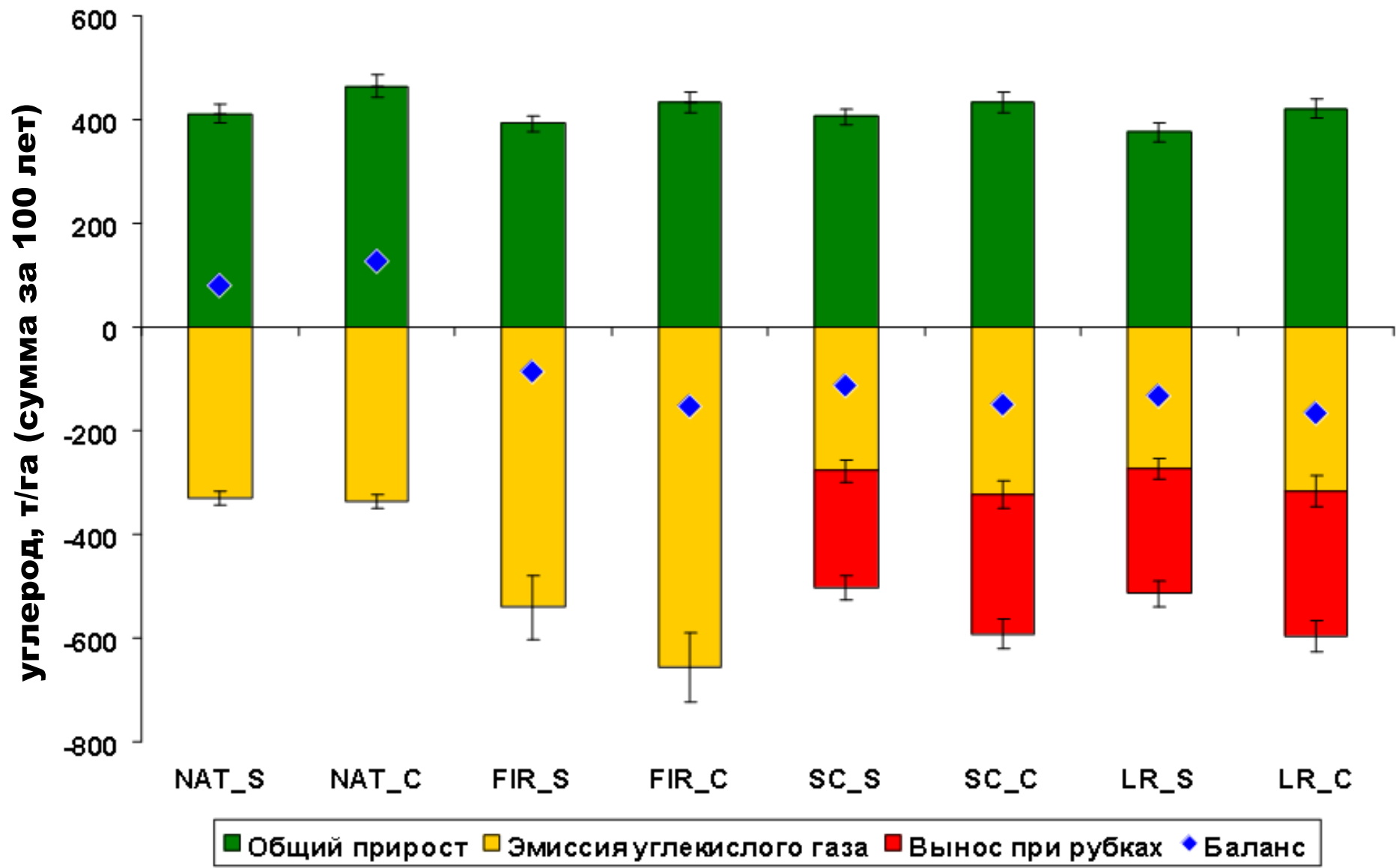
**Изменение климата (\_C).** Модель HadCM3, сценарий эмиссии парниковых газов A1Fi

А также – 4 уровня поступления соединений азота с атмосферными осадками: “фоновый”, “текущий” и 2 сценария роста.

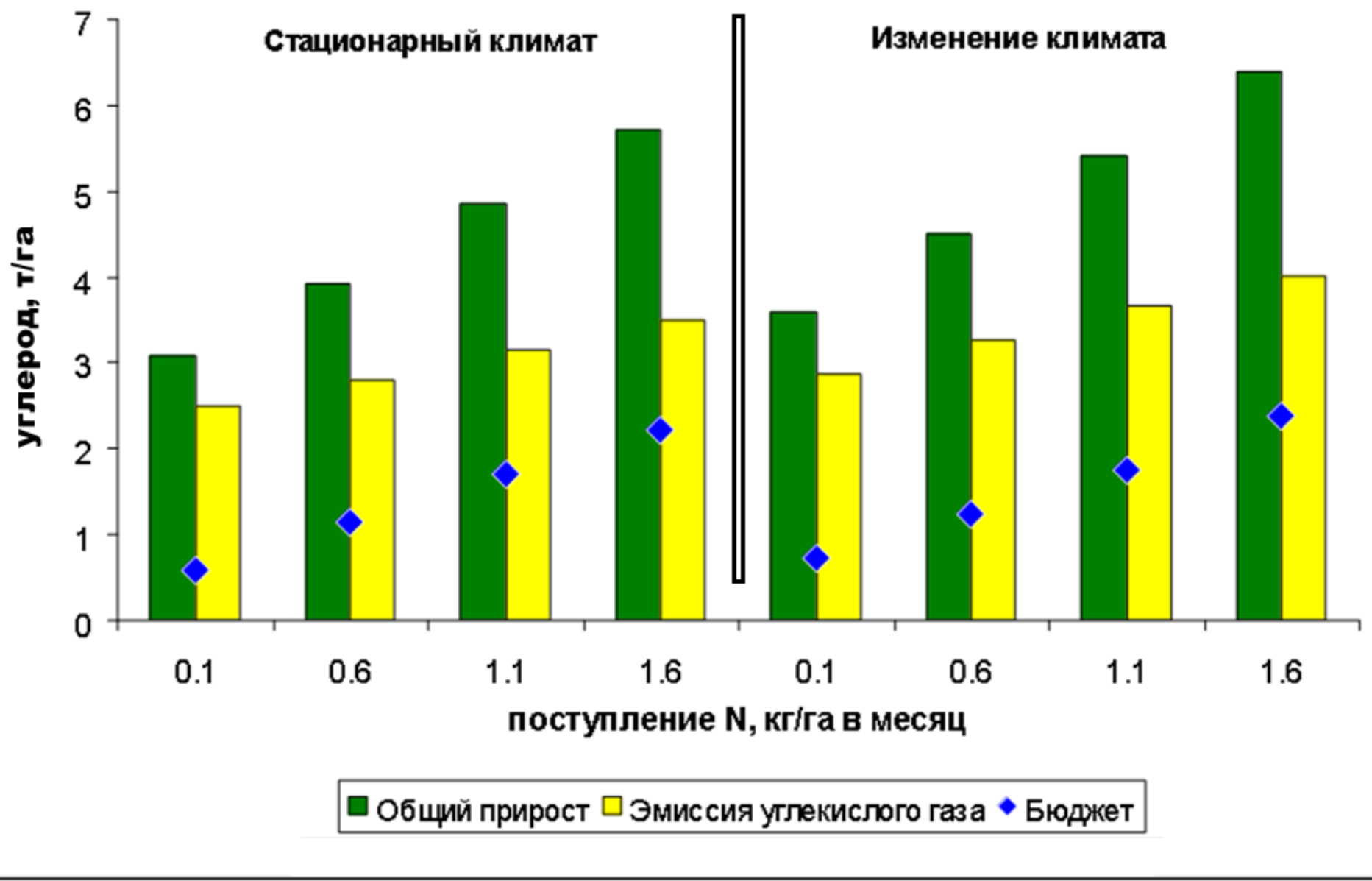
# Объекты исследования



- Мантуровское  
лестничество  
(Костромская обл.)
- 21637 выделов
- 180600 га
- Южная тайга
- Сумма осадков: 621 мм
- Средняя температура:  
3.0°C



**Баланс углерода в лесных экосистемах при различных сценариях**



**Баланс углерода при различных уровнях выпадения соединений азота**

- Система моделей EFIMOD может применяться для поддержки принятия решений при оценке возможных последствий внешних воздействий (лесных пожаров, климатических изменений, промышленных загрязнений окислами азота) и различных стратегий для обеспечения устойчивого и рационального лесопользования.
- Также возможно применение данной системы государственными органами разного уровня, осуществляющими контроль в области лесопользования, и для обучения специалистов в соответствующей области.
- В качестве входных параметров используются стандартные, легкодоступные данные. Кроме того, она может быть подстроена под требования конкретной задачи.



# Развитие системы моделей EFIMOD

- Модель гумификации органического вещества почв с учетом деятельности почвенной фауны
- Модели корневой и кроновой конкуренции
- Модель растительности напочвенного покрова
- Модель рельефа и микрорельефа
- Гидротермическая балансовая модель всей экосистемы
- Модель структуры почвенного покрова (дискретная почва, фитогенные поля, макро-педотурбации - ветровальный комплекс)
- Модель естественного возобновления
- Имитатор различных систем лесохозяйственных мероприятий для конкретного древостоя, выдела, лесничества, региона

# Развитие системы моделей EFIMOD

- Новые возможности модели за счет обновления ее блоков.
- Новые сценарии в т.ч. и с комбинированным действием факторов.
- Новые объекты для моделирования, в т.ч. с учетом пространственного аспекта (возникновение пожаров не в случайных выделах, а с учетом их распространения; рубки, имитирующие .

# Развитие экосистемной модели EFIMOD в рамках КТНИ Лес

- Совершенствование модели продукционного процесса и модели водно-теплового режима почвы для более полного учета воздействий, связанных с изменениями факторов среды

Рабочий план включает:

- Разработку пакетов сценариев
- Разработку блока моделирования продукционного процесса,
- Модификацию и уточнение параметров модели водно-теплового режима почвы на основе экспериментальных и литературных данных

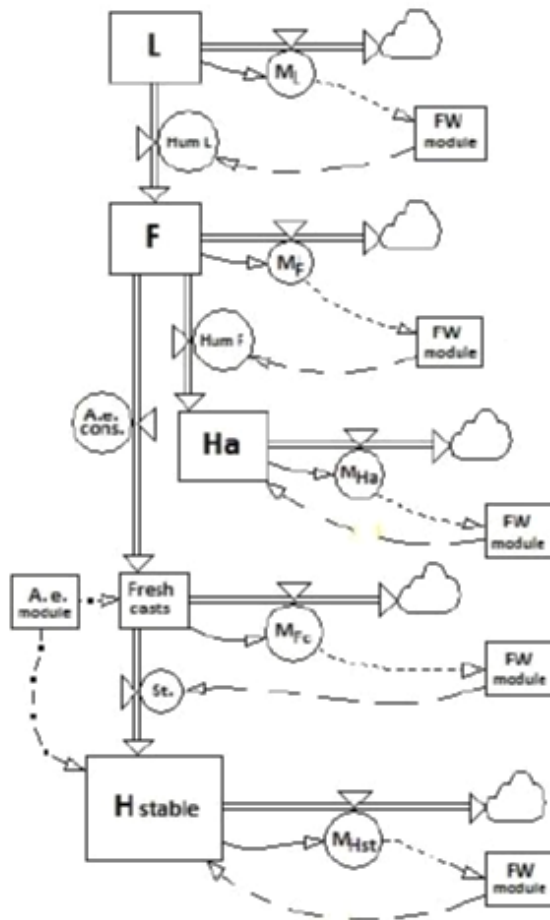


- Представленные результаты были получены сотрудниками лаборатории моделирования экосистем ИФХиБТПП РАН в разные годы и финансировались в рамках темы **54.8 «Моделирование круговорота биофильных элементов и сукцессионных процессов в лесных экосистемах»**, а также при финансовой поддержке **РФФИ** (гранты №№ 04-05-97221, 05-04-49284, 09-04-01209, 12-04-01269, 15-04-05400, 15-04-08712), **Академии наук Финляндии** (гранты №№ 140766, 257845), **Министерства образования и науки РФ** в рамках проекта № 14.616.21.0013 (уникальный идентификатор RFMEFI61614X0013).

***Спасибо за внимание!***

# Дальнейшее развитие системы моделей EFIMOD

ROMUL\_Hum – модель гумификации органического вещества почв с учетом деятельности почвенной фауны



На основе проведенного О.Г. Чертовым (2015) анализа данных по почвенным трофическим сетям были созданы и интегрированы в модель ROMUL (без существенного изменения ее структуры) два новых модуля : биоты трофических сетей (ТС) и дождевых червей.

Модель протестирована, описана в цикле статей, опубликованных в *Ecological Modelling*, 2017.

Предполагается ее интеграция в новую версию модели лесной экосистемы.

# Система моделей EFIMOD

## Авторский коллектив

### Пушино



Быховец С.С.



Грабарник П.Я.



Комаров Александр Сергеевич



Чертов Олег Георгиевич

### Санкт-Петербург



Михайлов А.В.



Зудин С.П.



Зубкова Е.В.



Шанин В.Н.



Припутина И.В.



Надпорожская М.А.



Шашков М.П.



Хараськина Ю.С.

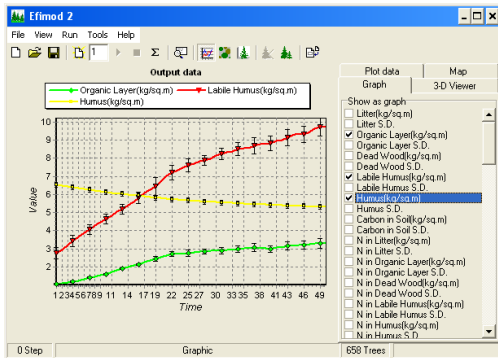
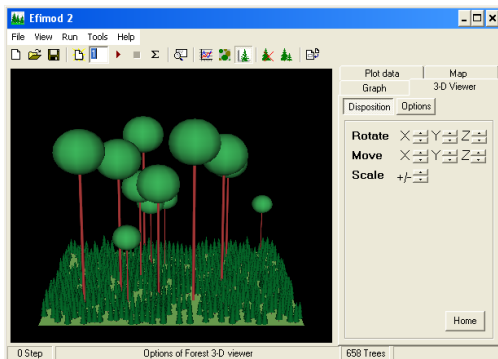
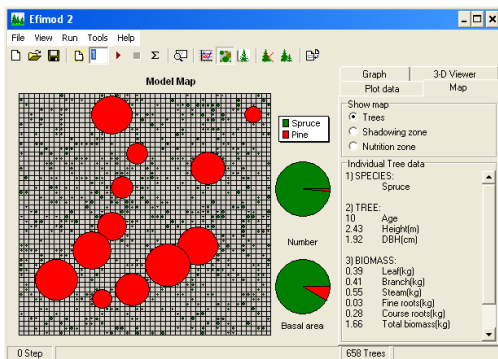


Безрукова М.Г.



Фролов П.В.

# EFIMOD: ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ



- Система моделей EFIMOD позволяет моделировать динамику разновозрастных и смешанных древостоев.
- Уровень реализации - лесотаксационный выдел. Временной шаг - 1 год (в модели ROMUL - 1 месяц).
- Необходимые **входные данные**:
  - ❖ Видовой состав древостоя на участке.
  - ❖ Число деревьев на гектар, возраст, сумма площадей сечения, запас древесины, средние высота и диаметр ствола на уровне груди для каждого вида и возрастной группы.
  - ❖ Содержание (**запасы**) органического вещества и азота в органических (лесной подстилке) и минеральных горизонтах почвы.
  - ❖ Временные ряды **температуры воздуха и осадков**, температура и влажность почвы и лесной подстилки.
  - ❖ **Поступление азота** из внешних источников.
- **Выходные переменные** (для видов и возрастных групп):
  - ❖ Средние диаметр и высота, сумма площадей сечения, запас древесины, число деревьев на гектар.
  - ❖ Биомасса, количество углерода и азота в каждом дереве.
  - ❖ Количество углерода и азота почвы, включая древесные остатки (сухой и валеж).

## EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

- **Статистический имитатор климата почвы SCLISS** (Быховец, Комаров, 2002) позволяет оценивать температуру и влажность почвы по рядам стандартных метеорологических данных (температуре воздуха и осадкам) месячного разрешения, а в случае необходимости – генерировать сами эти ряды по заданным статистическим параметрам.

### а) генератор «входных» метеорологических данных

Осадки:

$$r_m = e^{\mu_{r_m} + \nu_{r_m} \cdot n_1}$$

Температура воздуха:

$$T_{a,m} = \overline{T_{a,m}} + B_{aa,m} \cdot (T_{a,m-1} - \overline{T_{a,m-1}}) + B_{ar,m} \cdot (\ln r_m - \overline{\ln r_m}) + n_1 \cdot S_{T_{a,m}}$$



# EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

## ■ имитатор климата почвы **SCLISS**:

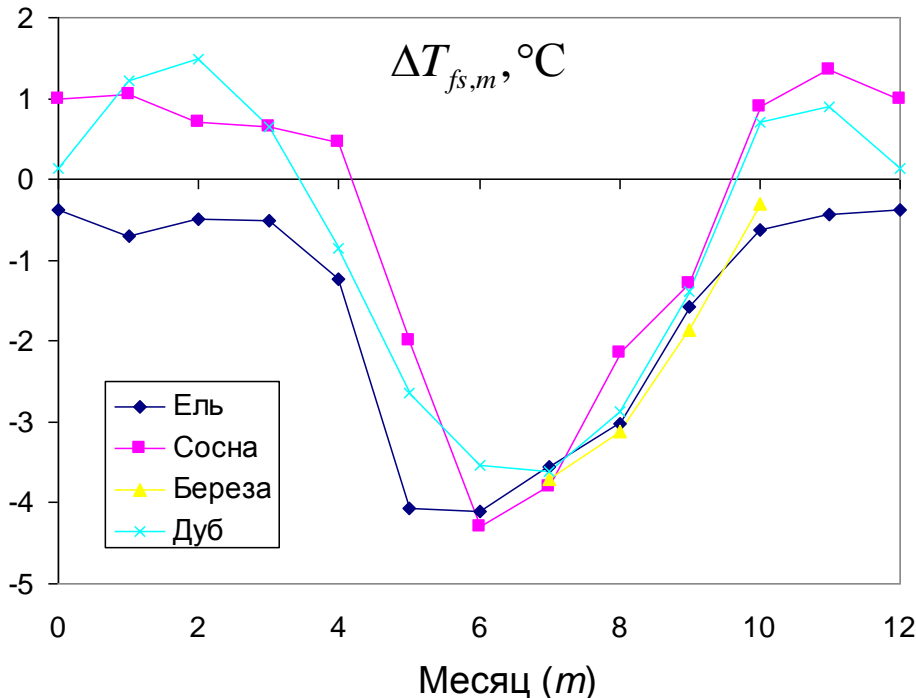
### б) Подмодель температуры почвы

Температура почвы под «естественным» покровом (косимой травой), глуб. 20см:

$$T_{s,m} = \overline{T_{s,m}} + B_{ss,m} \cdot (T_{s,m-1} - \overline{T_{s,m-1}}) + B_{sa,m} \cdot (T_{a,m} - \overline{T_{a,m}}) + n_1 \cdot S_{T_{s,m}}$$

Температура почвы в лесу (глубина 20 см):

$$T_{sf,m} = T_{s,m} + \Delta T_{fs,m}$$



Температура лесной подстилки:

$$T_{ff} = \begin{cases} T_a & \text{если } T_a > 0 \text{ и } T_{fs} > 0 \\ T_{fs} & \text{" } T_a < 0 \text{ и } T_{fs} < 0 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

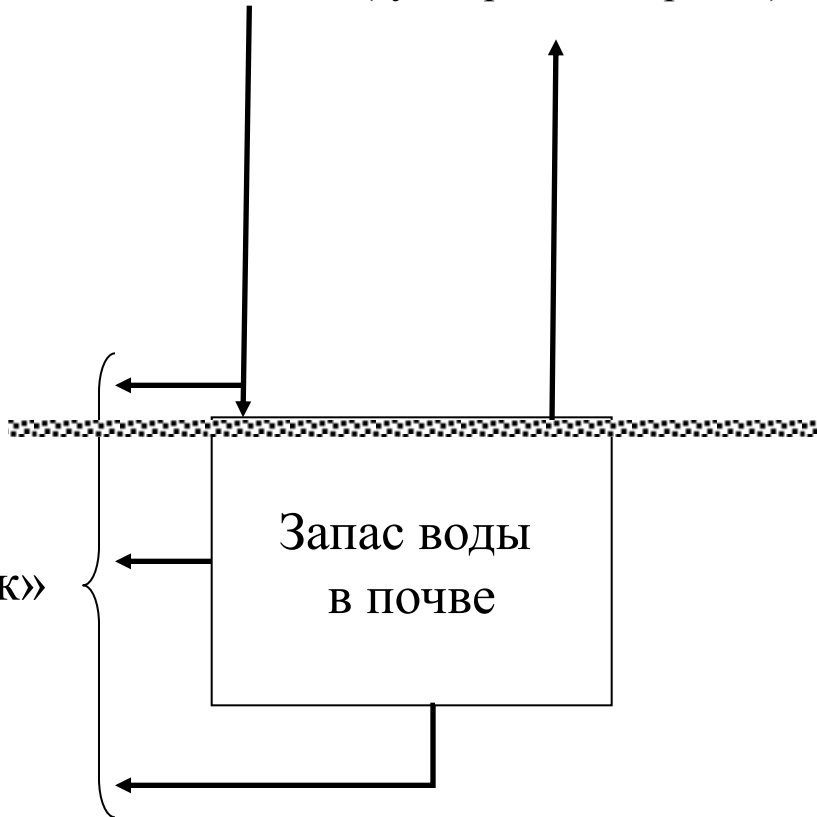
# EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

- имитатор климата почвы **SCLISS:**

## в) Подмодель влажности почвы

«базовая»

осадки      Эвапотранспирация  
                  (суммарное испарение)



«детализированная»

осадки      Эвапотранспирация  
                  (суммарное испарение)

