



Моделирование и прогнозные оценки динамики лесов в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов



**И.В. Припутина, Лаборатория моделирования экосистем
ИФХиБПП РАН, Пущино, Московская обл.
irina.priputina@gmail.com**

Авторский коллектив

Пушино



Грaбарник П.Я.



Быховец С.С.



Комаров Александр Сергеевич



Чертов Олег Георгиевич

Санкт-Петербург



Надпорожская М.А.



Михайлов А.В.



Зудин С.Л.



Зубкова Е.В.



Шанин В.Н.



Шашков М.П.



Хараськина Ю.С.



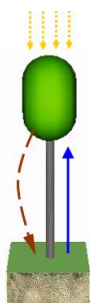
Безрукова М.Г.



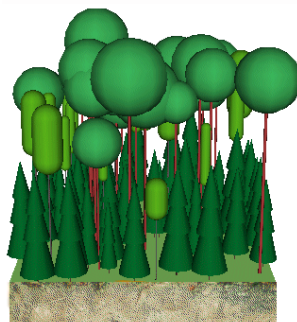
Фролов Т.В.

EFIMOD: структура, базовые принципы, допущения

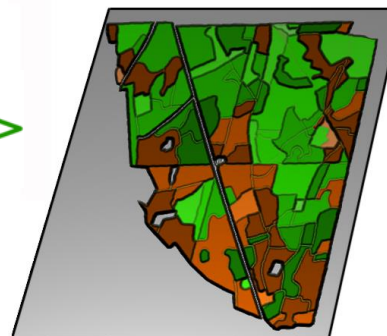
- **EFIMOD** (Komarov et al., 2003; Моделирование.., 2007) - система моделей биологического круговорота углерода и азота в лесной экосистеме, в которой древостой представлен пространственно распределенным сообществом деревьев (**individual based model**).
- **Основные блоки** (подмодели) EFIMOD:
 - ❖ Модель прироста биомассы отдельного дерева (состоит из 5 компонентов; рост зависит от освещенности и пула доступного азота; видоспецифичность в потреблении азота).
 - ❖ Пространственная модель древостоя (каждое дерево имеет пространственные координаты и взаимодействует с соседними деревьями, конкурируя за свет и азот).
 - ❖ Модель динамики органического вещества почвы **ROMUL** (Chertov et al., 2001) описывает разложение растительного опада, поступающего на/в почву, и динамику азота, доступного для растений; почвенный профиль разделен на органические и минеральные горизонты.
 - ❖ Статистический генератор климата **SCLISS** (Быховец, Комаров, 2002) позволяет оценивать температуру и влажность почвы по стандартным метеорологическим длинным рядам наблюдений.



**Моделирование роста
одного дерева**

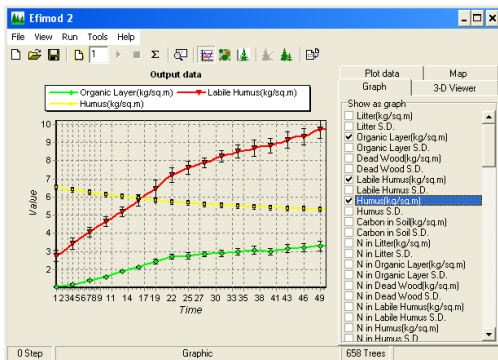
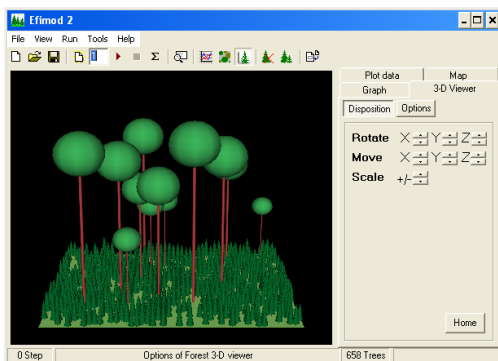
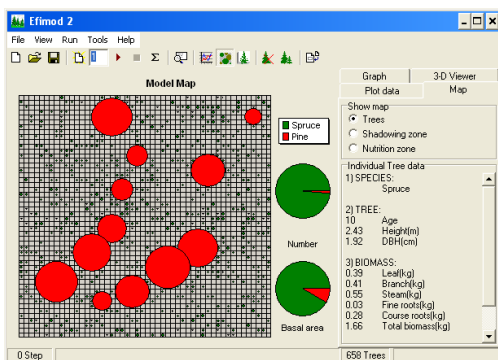


**Моделирование
древостоя**



**Моделирование
системы выделов**

EFIMOD: входные данные и выходные параметры



- Система моделей EFIMOD позволяет моделировать динамику разновозрастных и смешанных древостоев.
- Уровень реализации - лесотаксационный выдел. Шаг реализации для древостоя - 1 год, для почвы - 1 месяц.
- Необходимые **входные данные**:
 - ❖ Видовой состав древостоя на участке.
 - ❖ Число деревьев на гектар, возраст, сумма площадей сечения, запас древесины, средняя 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 параметры** (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 (сухостой и валеж).

EFIMOD: реализованный спектр модельных сценариев

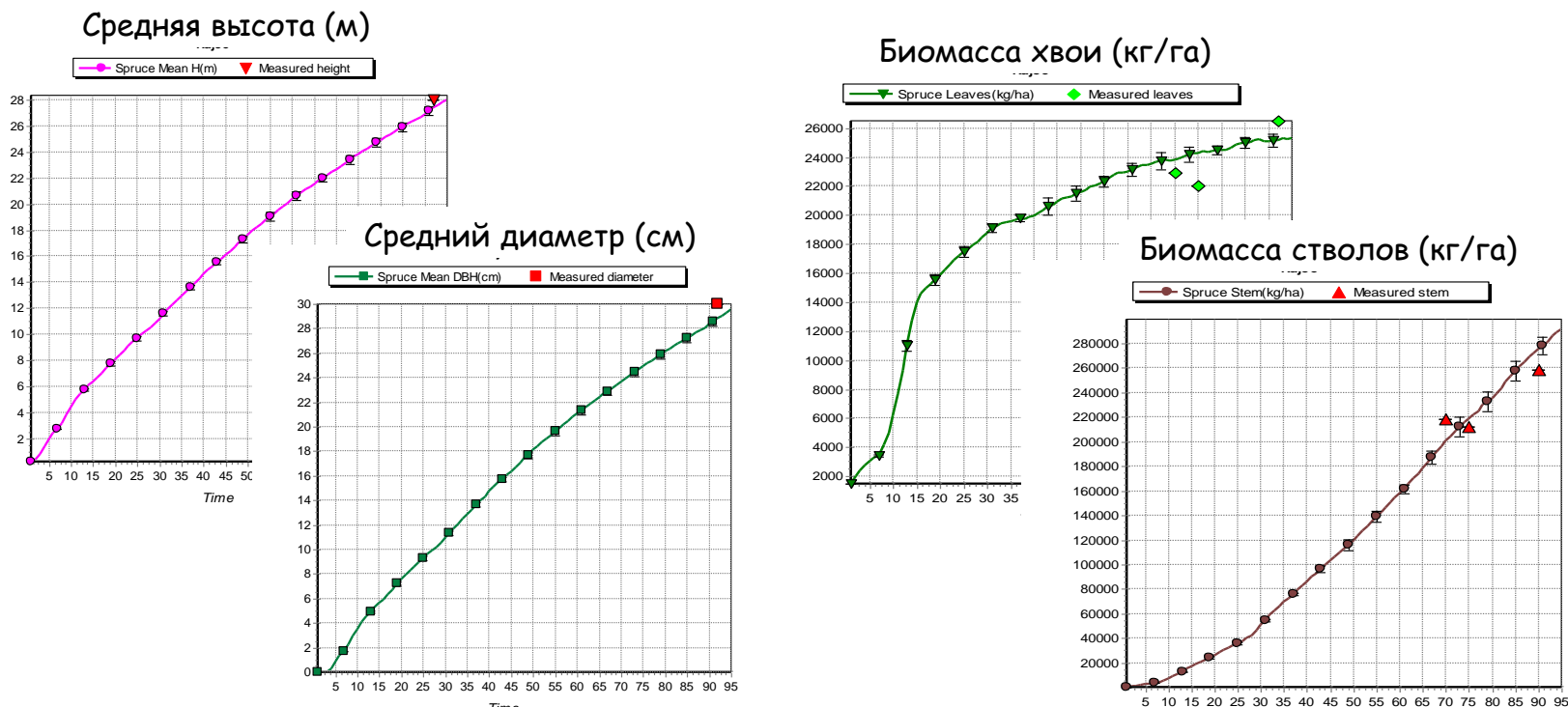
- **Влияние разных типов рубок и лесохозяйственных мероприятий**
 - Chertov O.G., Komarov A.S., Kolstrom M., Pitkanen S., et al. // *Forest Ecology and Management*, 2003: 176. P. 355-369.
 - Chertov O.G., Komarov A.S., Lukianov A.M., Mikhailov A.V. et al. // *Forest Ecology and Management*, 2006: 194. P. 227-232.
 - Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В. и др. // *Математическая биология и биоинформатика*, 2015, №2. С. 398-415.
- **Прогноз влияния климатических изменений**
 - Chertov O.G., Bhatti J., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. // *Forest Ecology and Management*, 2009: 257. P. 941-950.
 - Шанин В.Н., Михайлов А.В., Быховец С.С., Комаров А.С. // *Известия РАН, сер. Биологическая*, 2010, №6. С. 719-730.
 - Shanin V., Komarov A., Khoraskina Y., Bykhovets S. et al. // *Ecological Modelling*, 2013: 251. P. 232-245.
- **Прогноз влияния внешних катастрофических воздействий (лесных пожаров и др.).**
 - Комаров А.С., Кубасова Т.С. // *Известия РАН, сер. Биологическая*, 2007, №4. С. 490-500.
 - Чертов О.Г., Комаров А.С., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Бхатти Д.С. // *Лесоведение*. 2012. №2. С. 3-10.
- **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. С. 362-377.
 - Komarov A.S., Shanin V.N. // *Biogeosciences*, 2012. T. 9. №11. P. 4757-4770.
- **Ретроспективный анализ влияния исторических систем земледелия**
 - Bobrovsky M., Komarov A., Mikhailov A., Khanina L. // *Ecological Modelling*, 2010: 221. P. 953-959.
- **Моделирование изменения биоразнообразия в напочвенном покрове**
 - Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Комаров А.С., Михайлов А.В. И др. // *Лесоведение*, 2006, №1. С. 70-80.

EFIMOD: примеры верификации (1)

- EFIMOD был калиброван по литературным данным и верифицирован по независимым натурным данным для основных древесных видов Европы и Северной Америки.

Верификация в рамках проекта RECOGNITION (Smith et al., 1997)

по данным стационара Rajec (Чехия): данные для ели (*Picea abies*)

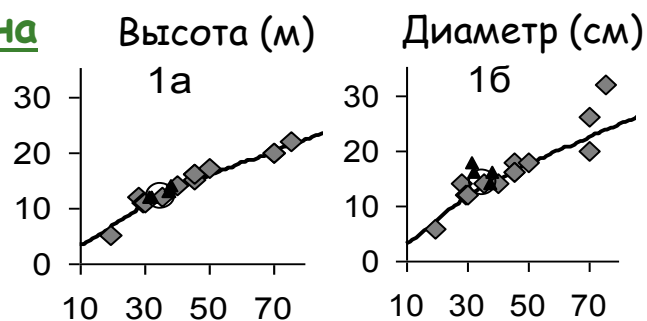


По оси абсцисс - возраст древостоя (лет).

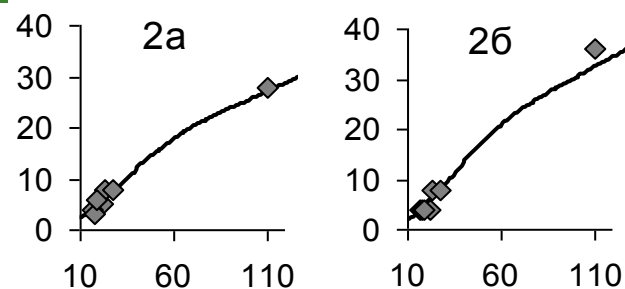
Точки на графиках - измеренные данные, линия - данные моделирования.

EFIMOD: примеры верификации (2)

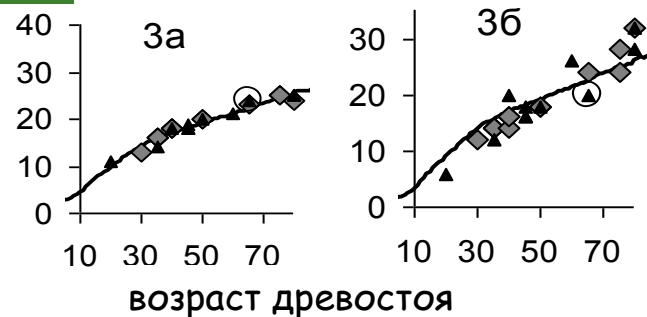
Сосна



Ель



Береза



◆ 1979 ▲ 1990 ○ 2001 — EFIMOD

Сравнение результатов моделирования с данными лесоустройства ОЛХ «Русский лес» (Московская область):

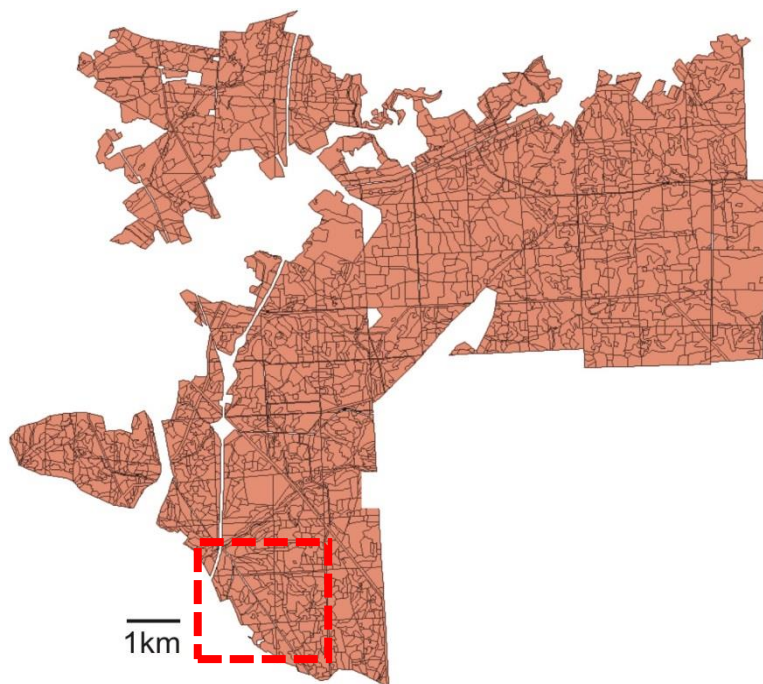
а - средняя высота древостоя (м),
б - средний диаметр ствола (см);
1 - сосна, 2 - ель, 3 - береза;
Ось абсцисс - возраст древостоя (лет);
Точки - данные лесоустройства за 1979, 1990, 2001 гг.;
Линия - результаты моделирования.

Примеры использования EFIMOD:

Влияние условий лесопользования на почвенный сток углерода (слайд 1)

- **ОЛХ «Русский лес» (Южное Подмосковье):**

- Площадь **66000 га**, число **выделов - 2200**.
- Подзона хвойно-широколиственных лесов. Климатические условия: средняя сумма осадков **634 мм**, средняя многолетняя температура воздуха **+ 5.0°C**.
- Почвенный покров - варианты дерново-подзолистых почв (суглинистые или супесчаные).



Имитационные сценарии:

NAT. Естественное развитие лесов (без рубок).

SCU. Сценарий имитирует две рубки ухода и затем следуют выборочные рубки каждые 30 лет (начиная с 80-ти лет) с выборкой каждый раз 30% от суммы площадей сечения деревьев в древостое. Порубочные остатки остаются на участке. Происходит успешное возобновление основных видов деревьев. Аналог - выборочные рубки в Германии.

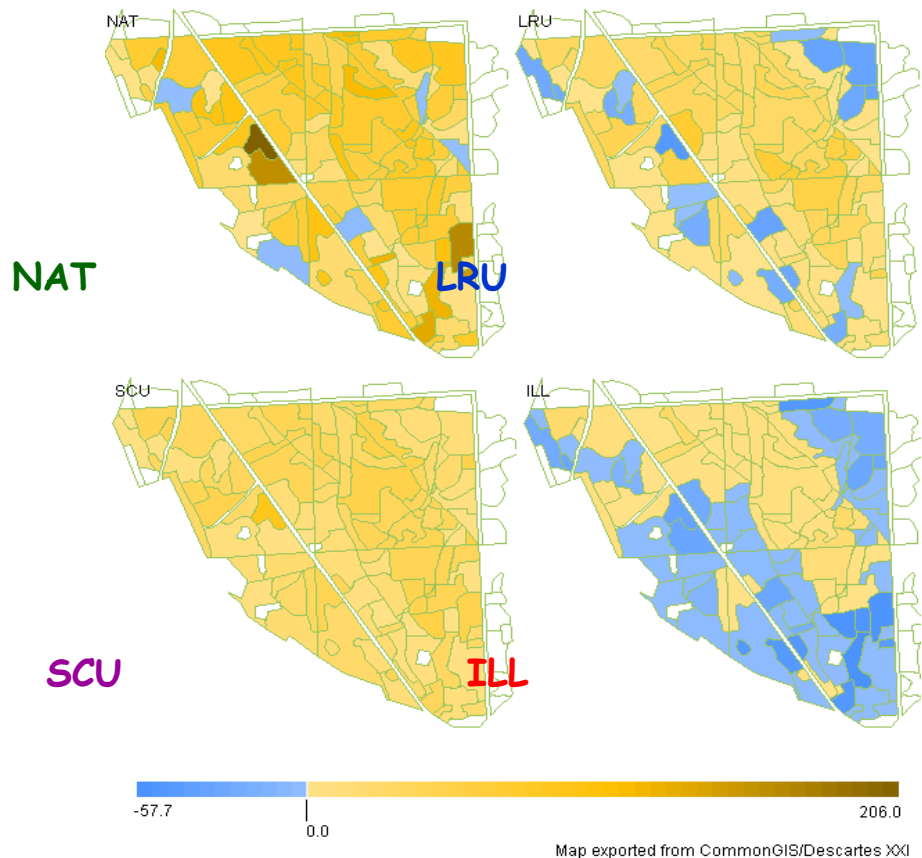
LRU. Имитируются четыре рубки ухода и рубка главного пользования, возраст которой зависит от главной породы. Рубка главного пользования сплошная, порубочные остатки удаляются. Аналог - система рубок, принятая в России.

ILL. Сценарий включает одну рубку промежуточного пользования по верховому методу (вырубка до 50% по сумме площадей сечений). Рубка главного пользования без сохранения естественного возобновления, порубочные остатки удаляются. Аналог - скандинавская система рубок.

Примеры использования EFIMOD:

Влияние условий лесопользования на почвенный сток углерода (слайд 2)

Изменение запасов углерода в почвах (т/га)



- Результаты отражают изменение почвенных запасов углерода между конечным и начальным состояниями после 200 лет лесопользования

NAT - естественное развитие.

SCU - с выборочными рубками.

LRU - с рубками ухода и сплошной рубкой главного пользования.

ILL - с промежуточной рубкой и сплошной рубкой главного пользования.

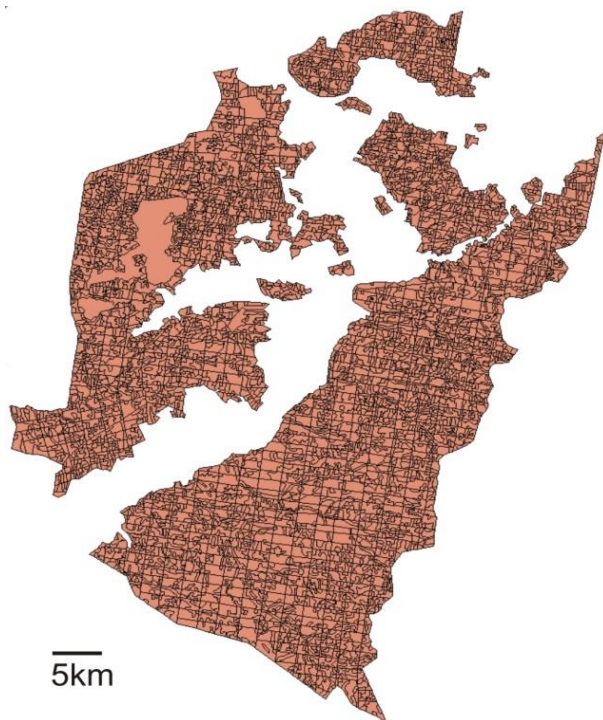
Reference: Комаров А.С. и др. Биогеохимический цикл углерода в лесных экосистемах центра Европейской России и его техногенные изменения // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 362-377

Примеры использования EFIMOD:

Отклик лесных экосистем на изменение климата и внешние воздействия (слайд 1)

Мантуровское лесничество (Костромская область):

- **Площадь 180600 га; число выделов – 21637.**
- Подзона южной тайги. Климатические условия: средняя сумма осадков 621 мм, средняя многолетняя температура воздуха + 3.0°C.
- Почвенный покров - варианты дерново-подзолистых почв (преимущественно суглинистые).



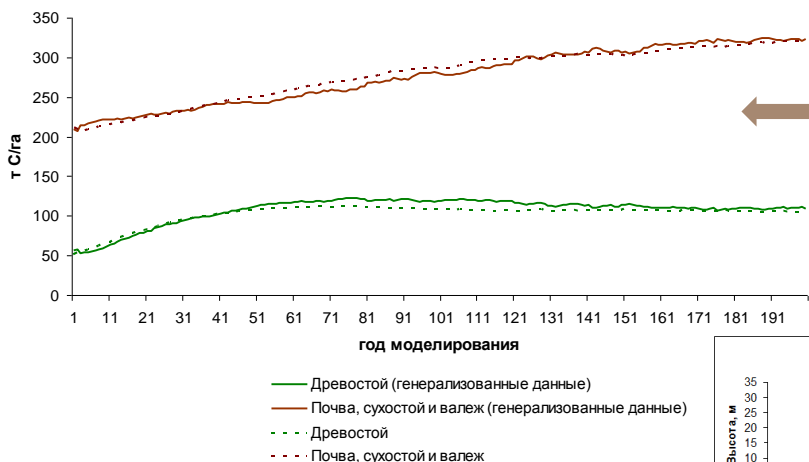
Имитационные сценарии:

Характеристика воздействия	1. Стационарный климат	2. Изменение климата*
1: Без рубок, естественное возобновление имитируется раз в 15 лет из расчета 1000 деревьев на гектар	1.1	1.2
2: Аналогично предыдущему, но с дополнительной имитацией лесных пожаров.	2.1	2.2
3: С двумя рубками ухода и последующей серией выборочных рубок с изъятием 35% деревьев (по сумме площадей сечений).	3.1	3.2
4: С четырьмя рубками ухода и последующей сплошной рубкой главного пользования.	4.1	4.2

* Модель HadCM3, сценарий эмиссии парниковых газов A1Fi (IPCC, 2000)

Примеры использования EFIMOD:

Отклик лесных экосистем на изменение климата и внешние воздействия (слайд 2)

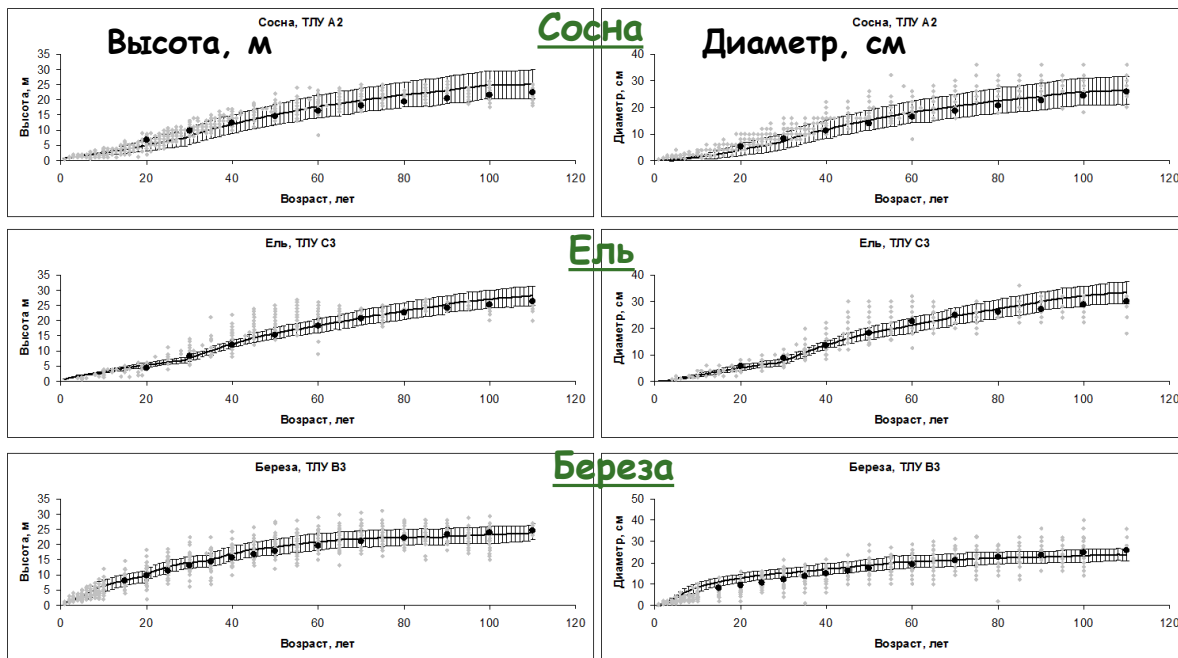


Генерализация данных:

- ✓ Группировка выделов по доминанту древостоя, типу лесорастительных условий, группе возраста.
- ✓ Внутри каждой из групп рассчитаны средневзвешенные значения запаса древостоя, полноты древостоя, коэффициентов участия и дендрометрических характеристик для каждого из видов деревьев.

Результаты верификации:

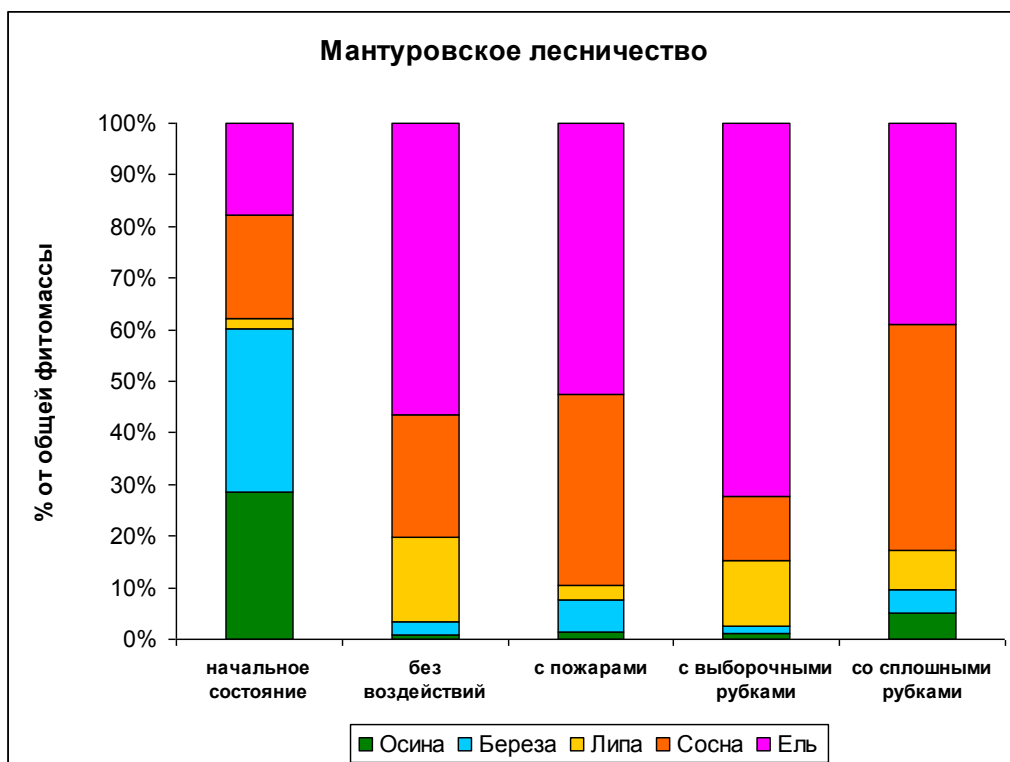
- ✓ Сплошная линия - результаты моделирования (с доверительным интервалом).
 - ✓ Черные метки - данные таблиц хода роста.
 - ✓ Серые метки - данные таксационных описаний по данным лесоустройства.
- По оси абсцисс - возраст, лет



Примеры использования EFIMOD:

Отклик лесных экосистем на изменение климата и внешние воздействия (слайд 3)

Динамика видового состава древостоев при различных сценариях лесопользования*



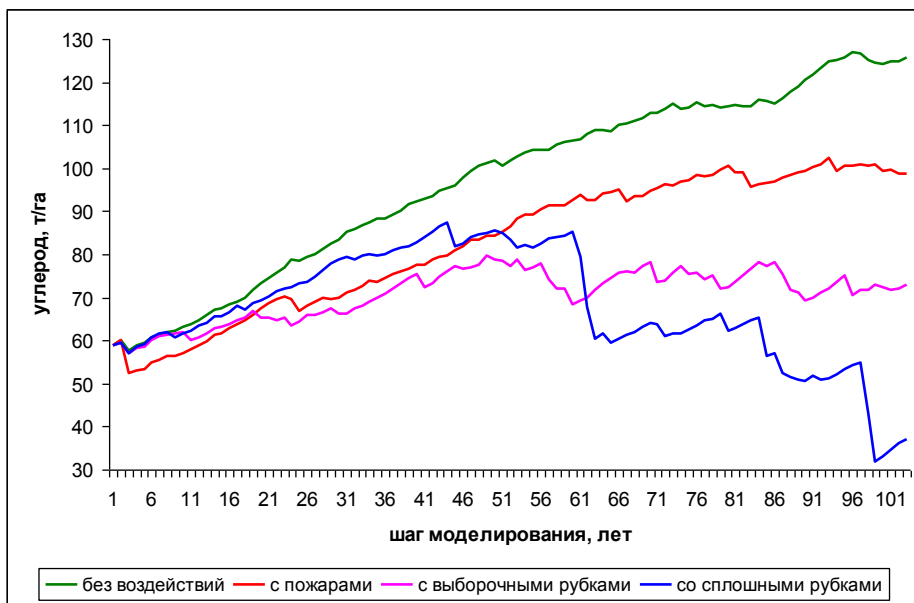
* Приведены данные для стационарного климата на конец периода моделирования (100 лет)

Reference: Шанин В.Н. Имитационное моделирование динамики лесных экосистем при различных лесохозяйственных и климатических сценариях. Дисс. к.б.н. 2011.

Примеры использования EFIMOD:

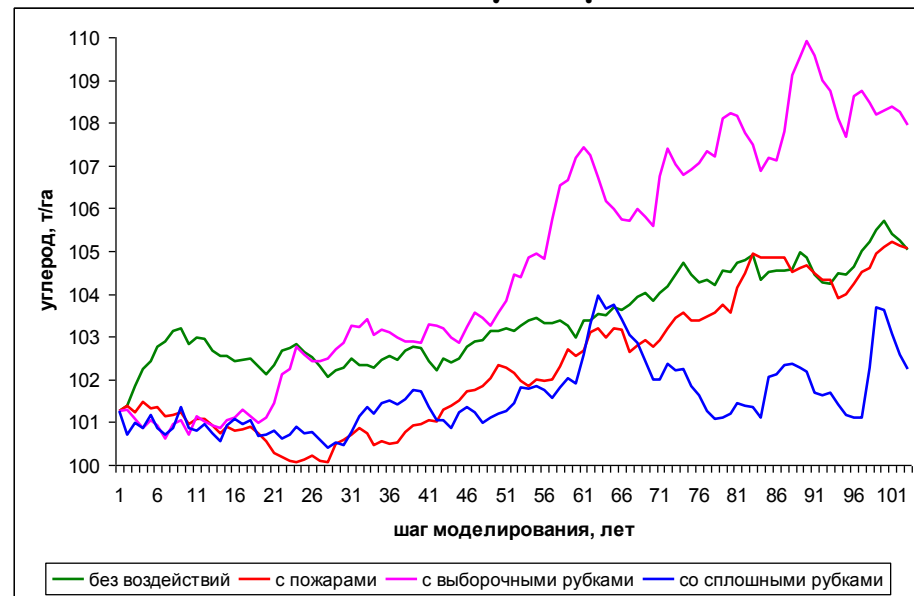
Отклик лесных экосистем на изменение климата и внешние воздействия (слайд 4)

Динамика запасов углерода в древостое



- По оси ординат - запасы C , т/га
- По оси абсцисс - шаг моделирования, лет

Динамика запасов углерода в почве

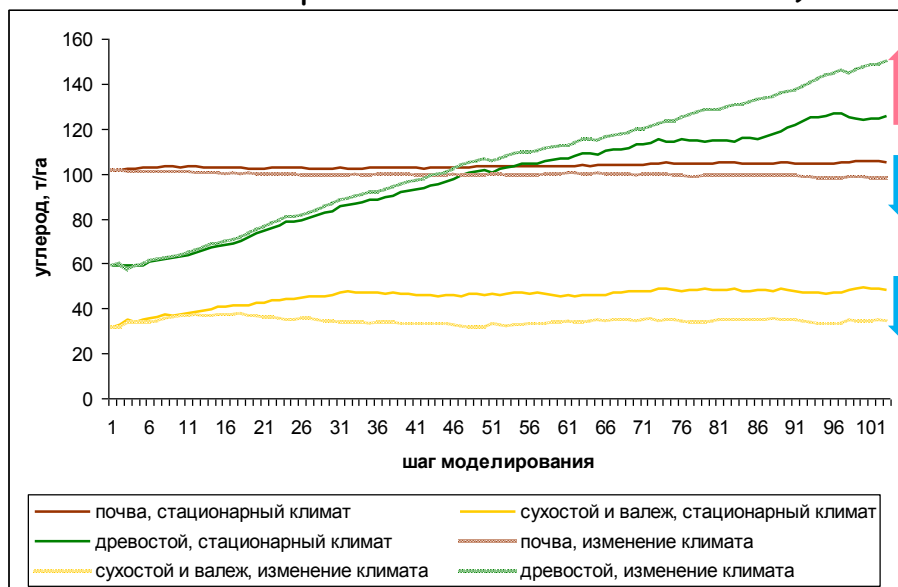


Reference: Шанин В.Н. и др. Глобальные изменения климата и баланс углерода в лесных экосистемах бореальной зоны: имитационное моделирование как инструмент прогноза // *Известия РАН. Серия биологическая*, 2010. №6, – С. 719-730.

Примеры использования EFIMOD:

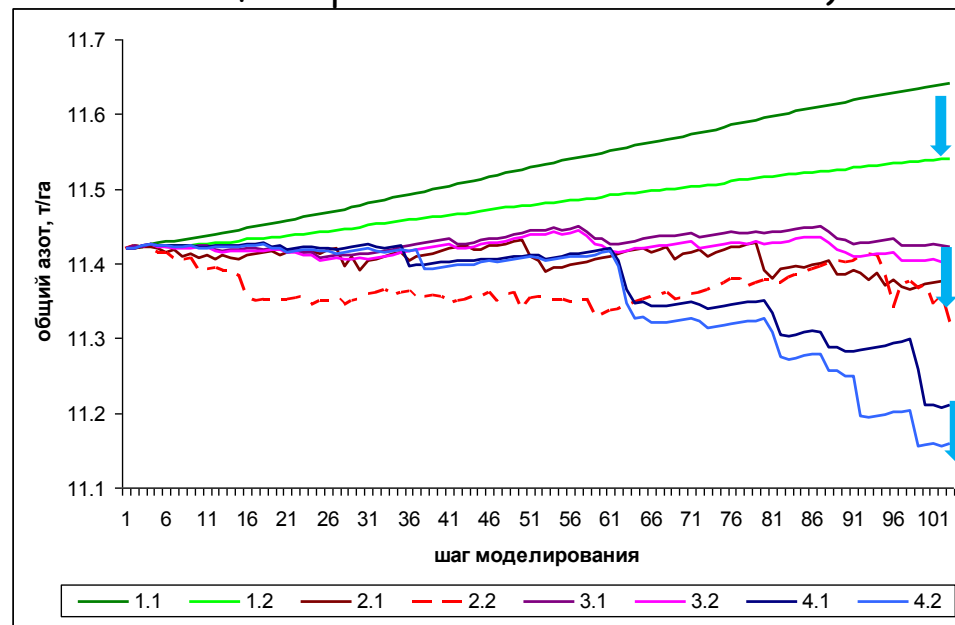
Отклик лесных экосистем на изменение климата и внешние воздействия (слайд 5)

Динамика запасов C в компонентах экосистем
(Сценарий естественного развития лесов при стационарном и изменении климата)



- По оси ординат - запасы C, т/га
- По оси абсцисс - шаг моделирования, лет

Динамика запасов N в почве
(Сценарии разных типов лесопользования при стационарном и изменении климата)



- По оси ординат - запасы N, т/га
- По оси абсцисс - шаг моделирования, лет
- Номера сценариев в соответствии с таблицей слайда 11

Reference: Шанин В.Н. и др. Глобальные изменения климата и баланс углерода в лесных экосистемах бореальной зоны: имитационное моделирование как инструмент прогноза // *Известия РАН. Серия биологическая*, 2010. №6, – С. 719-730.

Примеры использования EFIMOD:

Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на цикл С и N в лесах бореальной зоны (слайд 1)

- Решалась задача прогноза экологических изменений в лесных экосистемах при внедрении биотехнологических форм (генно-модифицированных осин).
- Имитировалось создание лесных плантаций с коротким оборотом рубки (30 лет) на основе естественных и генно-модифицированных форм осины с измененными параметрами роста и повышенным содержанием азота в органах (линия Heg1b (Шестибратов и др., 2012)).
- Модельный эксперимент выполнен на примере почвенно-климатических условий ельников северо-запада Ленинградской области.

Имитационные сценарии:

Код сценария	Форма осины	Рубки ухода (C)	Применение удобрений (F)	Модификация ростовых характеристик (G)	Повышенное содержание азота в органах (N)
Nat_	природная	-	-	-	-
Nat_C	природная	X	-	-	-
Nat_CF	природная	X	X	-	-
Heg_CFN	модифицированная	X	X	-	X
Heg_CFG	модифицированная	X	X	X	-
Heg_CFGN	модифицированная	X	X	X	X

Примеры использования EFIMOD:

Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на цикл С и N в лесах бореальной зоны (слайд 2)

Количество хозяйственно-ценной древесной биомассы (т/га),
полученное в результате лесохозяйственных мероприятий
при различных сценариях

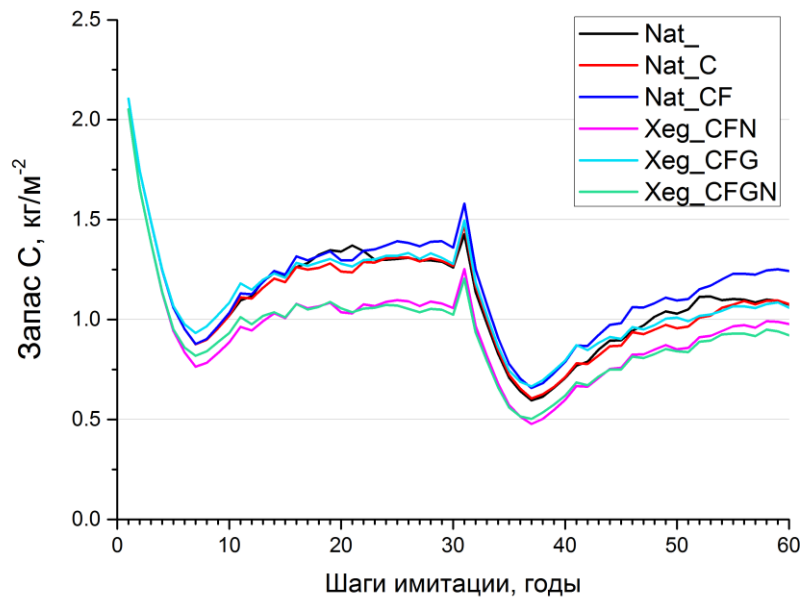
Лесохозяйственные мероприятия	Сценарий					
	Nat_	Nat_C	Nat_CF	Xeg_CFN	Xeg_CFG	Xeg_CFGN
I рубка ухода		5.9	6.1	5.7	9.9	9.1
II рубка ухода		11.5	12.1	11.0	15.9	14.9
Сплошная рубка	78.1	94.8	99.6	90.1	116.9	101.0
Всего за I оборот рубки	78.1	112.2	117.8	106.8	142.7	125.0
I рубка ухода		4.2	4.8	4.1	7.4	6.2
II рубка ухода		8.1	9.6	7.9	11.9	10.9
Сплошная рубка	67.1	75.7	89.4	79.2	91.0	91.4
Всего за II оборот рубки	67.1	88.0	103.8	91.2	110.3	108.5
Различие между II и I оборотами рубки, %	-14.1	-21.6	-11.9	-14.6	-22.7	-13.2
Суммарно за два оборота рубки	145.2	200.2	221.6	198.0	253.0	233.5

Reference: Комаров А.С. и др. Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот С и N в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент // *Математическая биология и биоинформатика*. 2015, №2. С. 398-415.

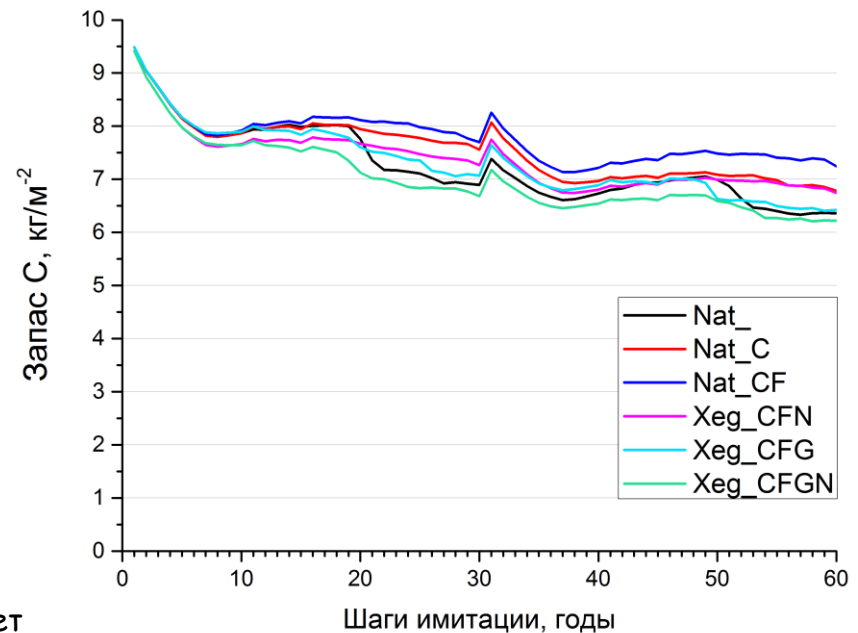
Примеры использования EFIMOD:

Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на цикл С и N в лесах бореальной зоны (слайд 3)

Динамика запасов углерода в органических (1) и минеральных (2) горизонтах почв



- По оси ординат - запасы С, кг/м²
- По оси абсцисс - шаг моделирования, лет

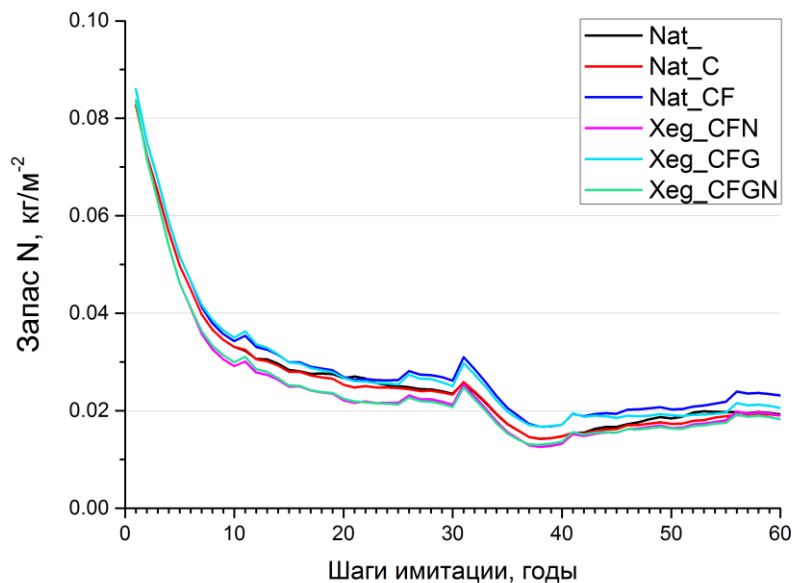


Reference: Комаров А.С. и др. Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот С и N в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент // *Математическая биология и биоинформатика*. 2015, №2. С. 398-415.

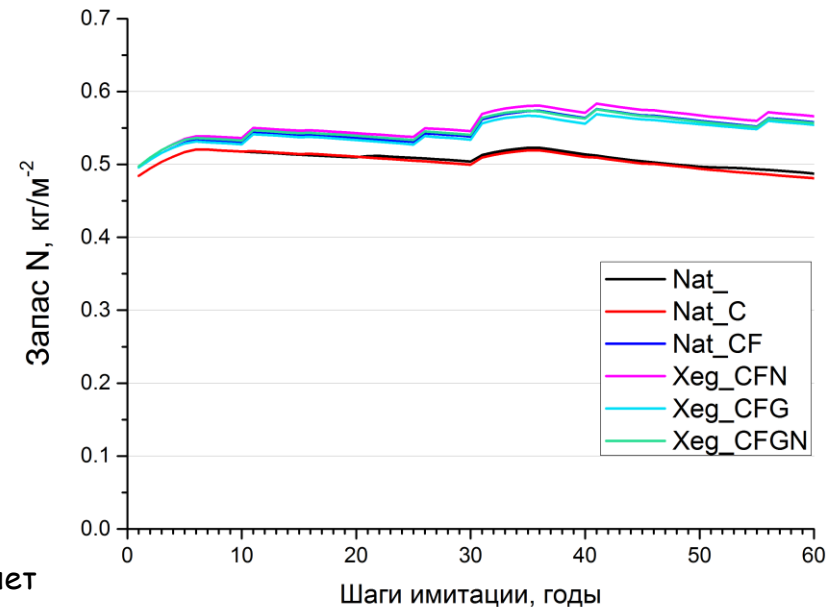
Примеры использования EFIMOD:

Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на цикл C и N в лесах бореальной зоны (слайд 4)

Динамика запасов азота в органических (1) и минеральных горизонтах почв (2)



- По оси ординат - запасы N, кг/м²
- По оси абсцисс - шаг моделирования, лет



Reference: Комаров А.С. и др. Воздействие осиновых плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот C и N в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент // *Математическая биология и биоинформатика*. 2015, №2. С. 398-415.

- Представленные результаты исследований 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), **Министерства образования и науки РФ** в рамках проекта № 14.616.21.0013 (уникальный идентификатор RFMEFI61614X0013).

Благодарю за внимание!