



# Цифровой двойник лесной экосистемы: концепция и перспективы

Грбарник Павел Яковлевич, Шанин В.Н., Припутина И.В., П.В. Фролов

ИФХиБПП РАН - ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино

26.04.2022, ЦЭПЛ РАН, Москва



## «УТИНЫЙ ТЕСТ»

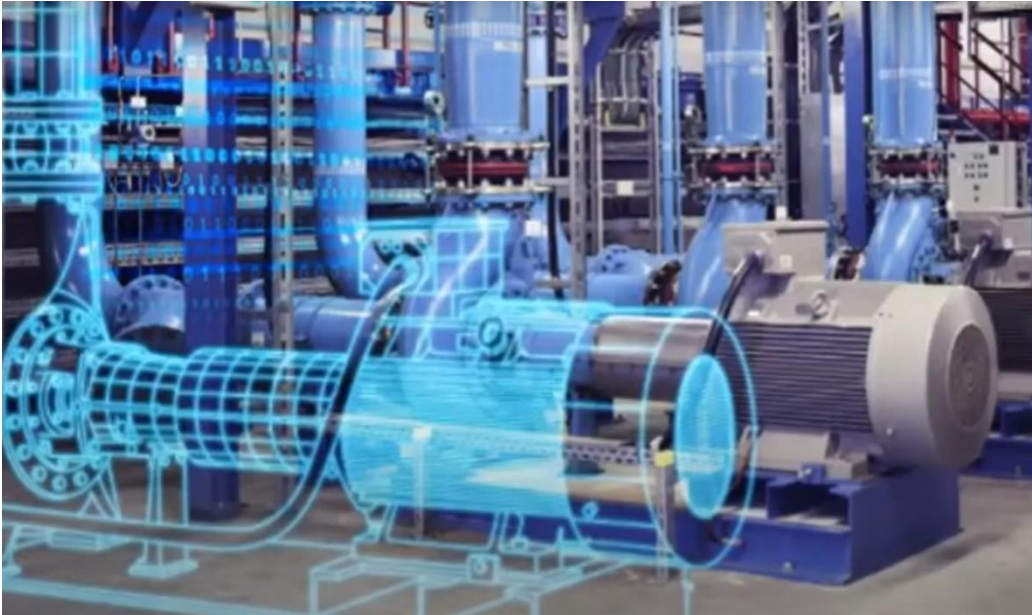
- Если нечто выглядит как утка, плавает как утка и крякает как утка, то это, вероятно, и есть утка

## «УТИНЫЙ ТЕСТ»

- Если нечто выглядит как утка, плавает как утка и крякает как утка, то это, вероятно, и есть утка или ее *цифровой двойник*.

# Цифровой двойник

Цифровой двойник – это виртуальная (цифровая) копия реального объекта, имитирующая до неразличимости поведение или функционирование оригинального объекта



Это может быть, например, самолет, автомобиль или человек

Цифровые двойники - это основа индустрии 4.0

# Цифровой двойник

Цифровой двойник реализуется набором связанных имитационных моделей, которые взаимодействуют как между собой, так и с реальным объектом.

# Цифровой двойник

Цифровой двойник реализуется набором связанных имитационных моделей, которые взаимодействуют как между собой, так и с реальным объектом.

**Цифровой двойник ~~равно~~ имитационное моделирование**

# Цифровой двойник

Цифровой двойник реализуется набором связанных имитационных моделей, которые взаимодействуют как между собой, так и с реальным объектом.

**Цифровой двойник ~~равно~~ имитационное моделирование**

Цифровой двойник = имитационные модели + интернет вещей (IoT)

# Пример цифрового двойника в промышленной экологии

Компания «Мегафон» продвигает свою систему экомониторинга, основанную на внедрении цифровых решений, обеспечивающих постоянный контроль состояния атмосферного воздуха и других компонентов окружающей среды



# Лесные экосистемы - многокомпонентный объект со сложной пространственной структурой разного масштабного уровня

---



# Лесные экосистемы – как далеко мы от построения цифрового двойника?

---

## Датчики и системы сбора информации

1. Измерение прироста ствола
2. Датчики влажности и температуры почвы
3. Фотоловушки
4. Опадоуловители
5. Газоанализаторы
6. Метеорологические станции (температура, скорость ветра, количество осадков)
7. Датчики освещенности
8. ПАМ флуориметры
9. Наземные и воздушное лазерное сканирование
10. Дистанционное зондирование
11. Вышка для измерения потоков парниковых газов

# Лесные экосистемы – как далеко мы от построения цифрового двойника?

---

## Имитационные модели

### Моделирование древесного яруса

- Продукционная модель
- Модель кроновой конкуренции
- Модель возобновления
- Модель отмирания

### Модели травяно-кустарничкового яруса

### Моделирование корневой конкуренции

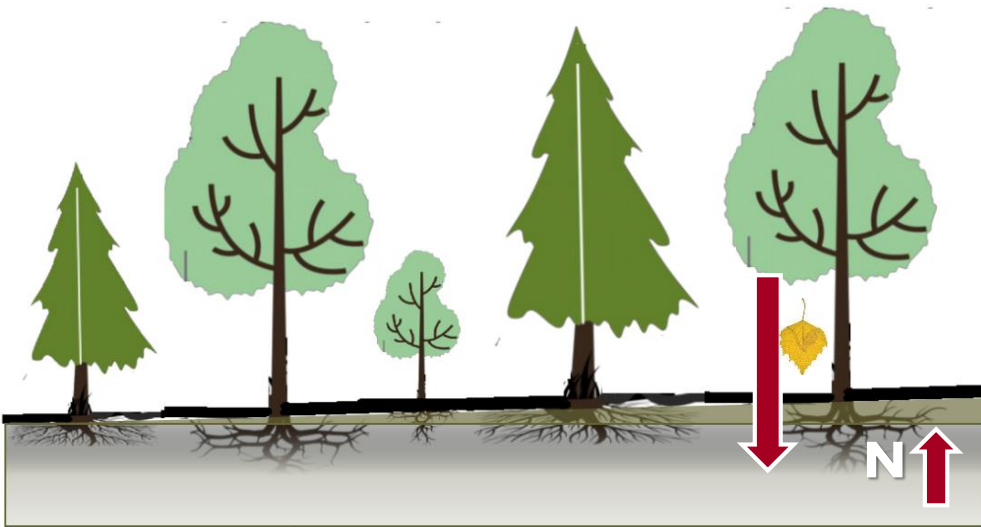
### Моделирование почвенных процессов

### Модели и режимы рубок

### Модели катастрофических воздействий (пожары, ветровалы, вспышки вредителей)

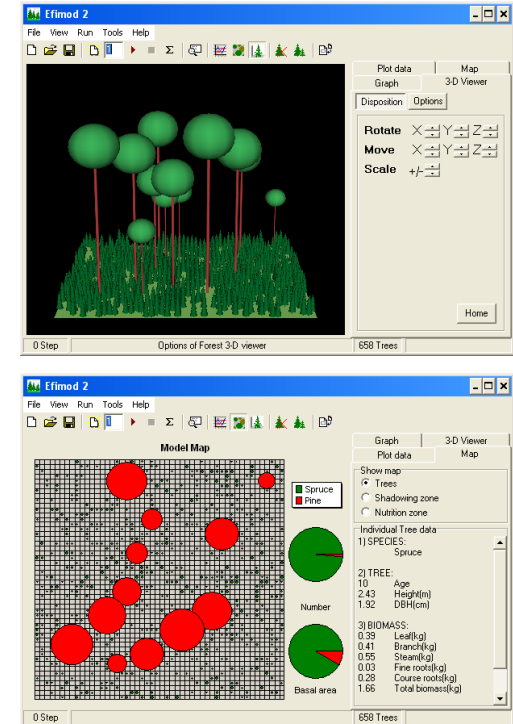
# 2-х компонентная структура лесной экосистемы: EFIMOD-2 + ROMUL / SCLISS

## Биогенный круговорот C и N



## Древостой

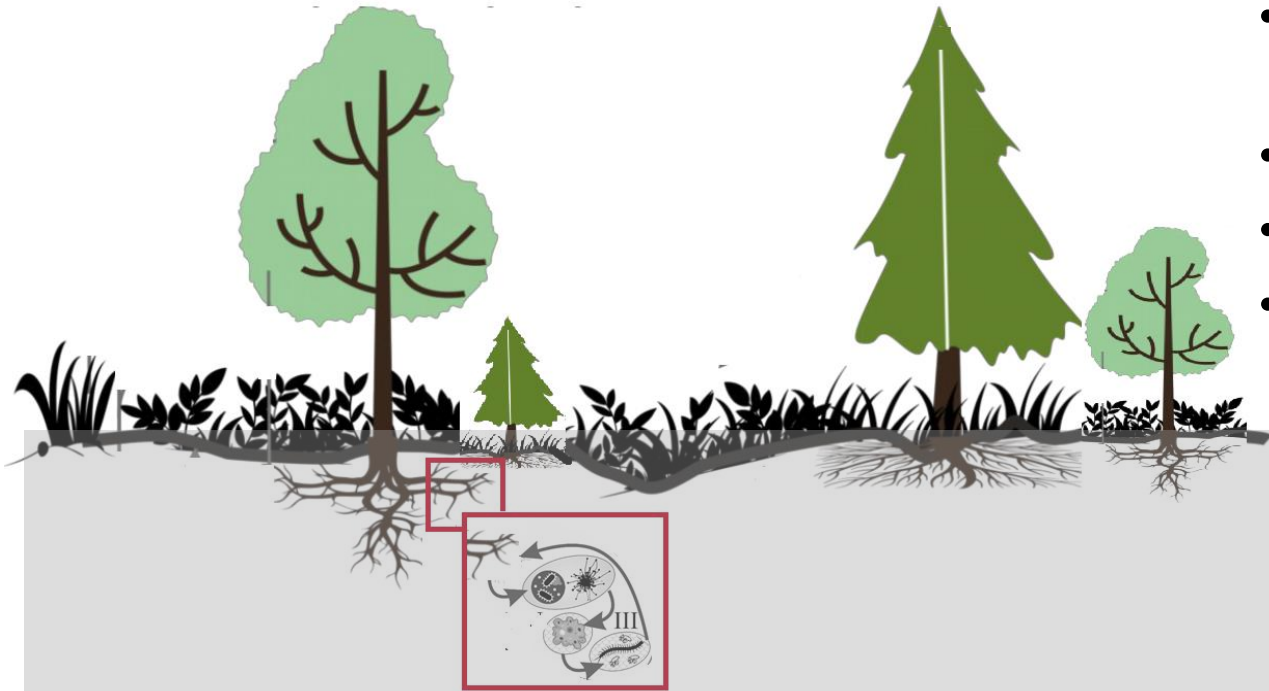
- Размещение деревьев в пространстве.
- Разновидовой и разновозрастной состав.
- Конкуренция за свет и доступный азот почвы между соседними деревьями.
- Видоспецифичное распределение приростов фитомассы по органам.
- Видоспецифичность C:N разных фракций опада.



## Почва

- Вертикальный профиль из 2 горизонтов.
- Раздельная динамика фракций поверхностного и внутрипочвенного опада.
- Отсутствие пространственной неоднородности поступления опада и почвенных гидротермических условий.

# Компонентная структура новой системы моделей EFIMOD-3



## Почва

- Пространственная неоднородность («patchwork»).
- Учет почвенной биоты в трансформации ОВ.
- Ризосферные эффекты.

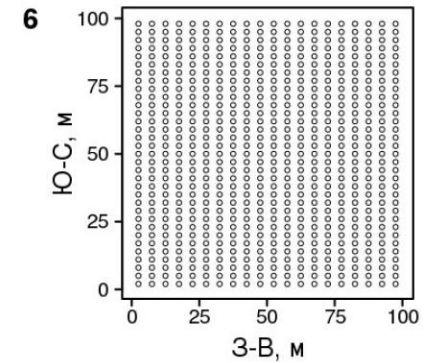
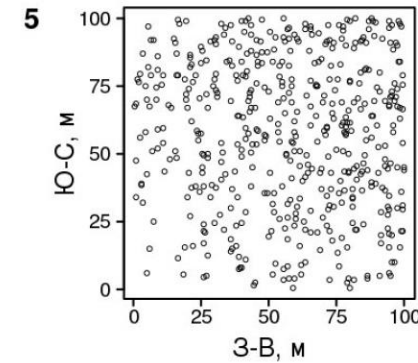
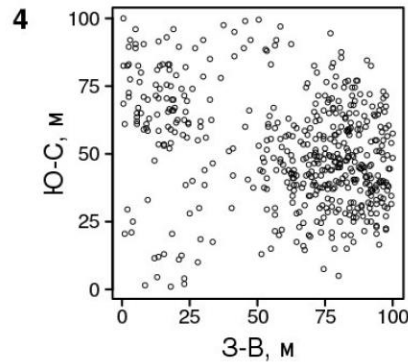
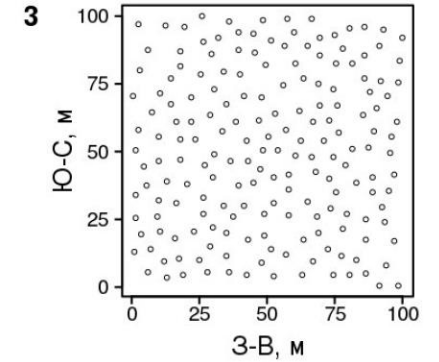
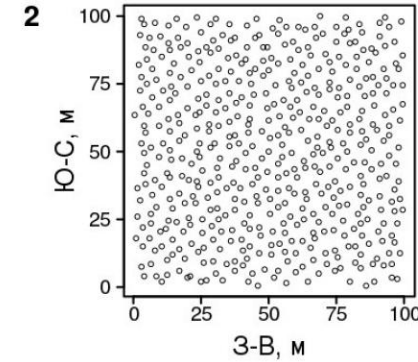
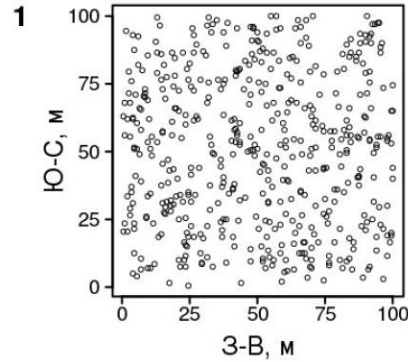
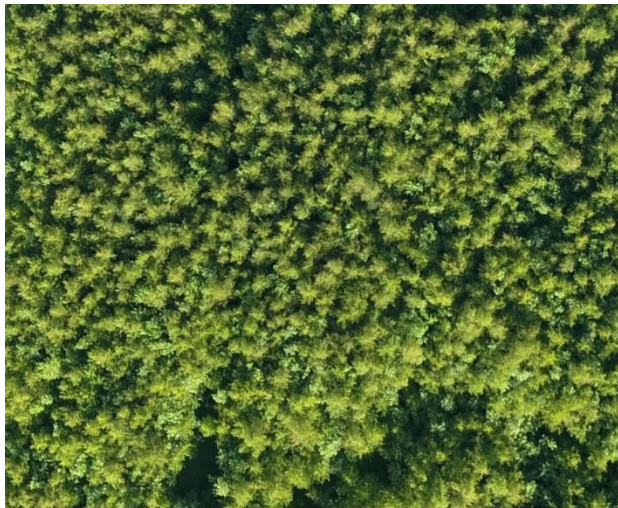
## Древостой

- Продукция биомассы деревьев на основе воспроизведения экофизиологических процессов
- Асимметрия крон
- Пространственное распределение опада
- Корневая конкуренция

## Травяно-кустарничковый ярус

- Разрастание в пространстве.
- Видоспецифичная продуктивность фракций фитомассы.
- Конкуренция за ресурсы среды.

# Пространственная структура древостоя



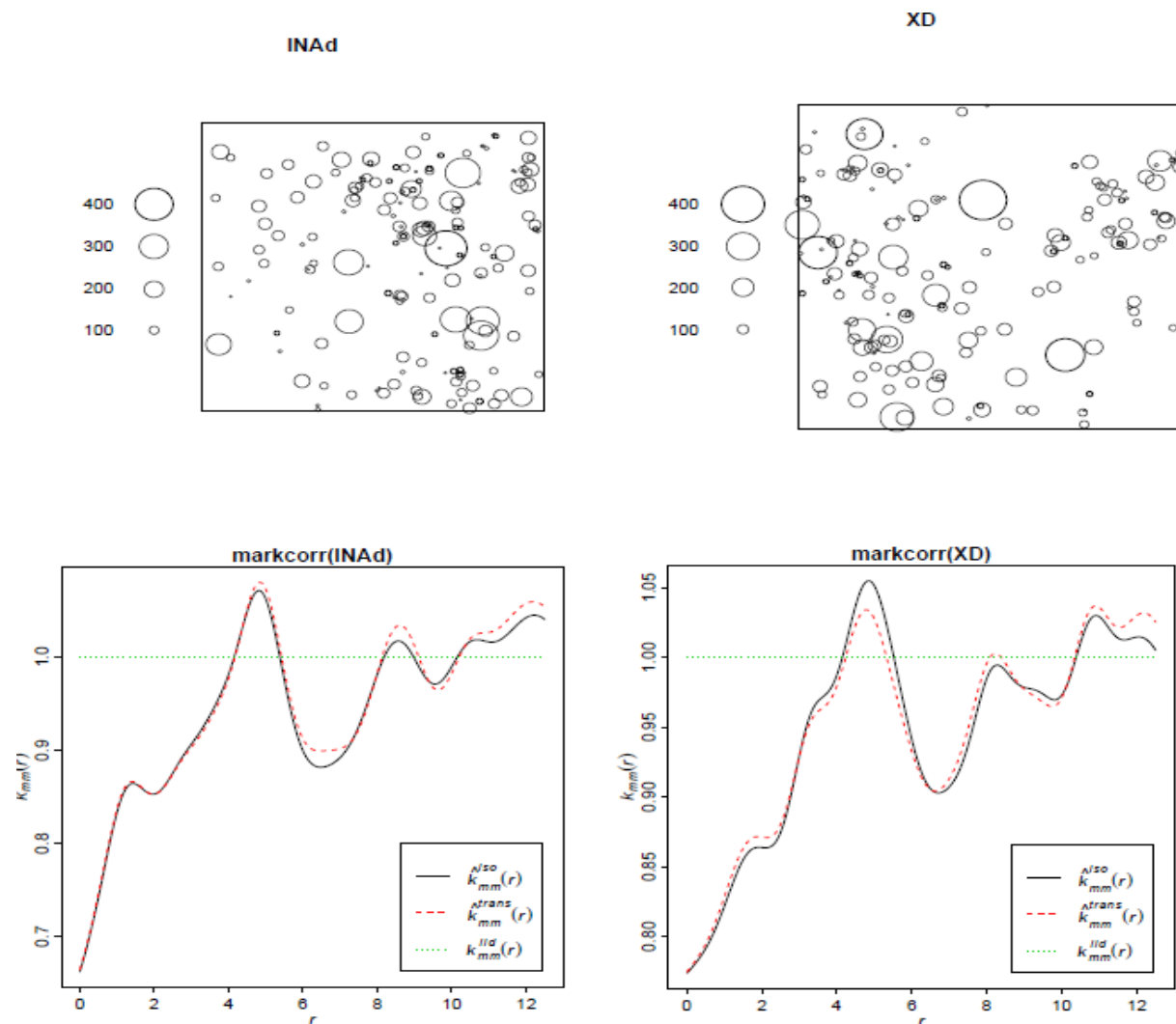
Реализация разных вариантов начального размещения деревьев:

1 – равномерное псевдослучайное; 2 – псевдослучайное с предельным расстоянием (приоритет плотности древостоя);

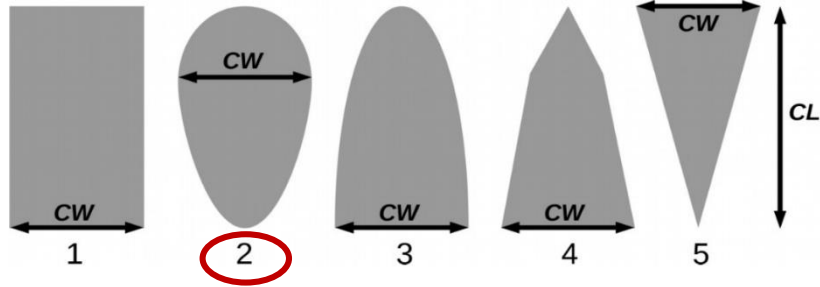
3 – псевдослучайное с предельным расстоянием (приоритет минимального расстояния); 4 – кластеризованное;

5 – градиентное; 6 – регулярное.

# Пример применения метода реконструкции для имитации пространственной структуры сосново-елового древостоя с учетом размеров деревьев



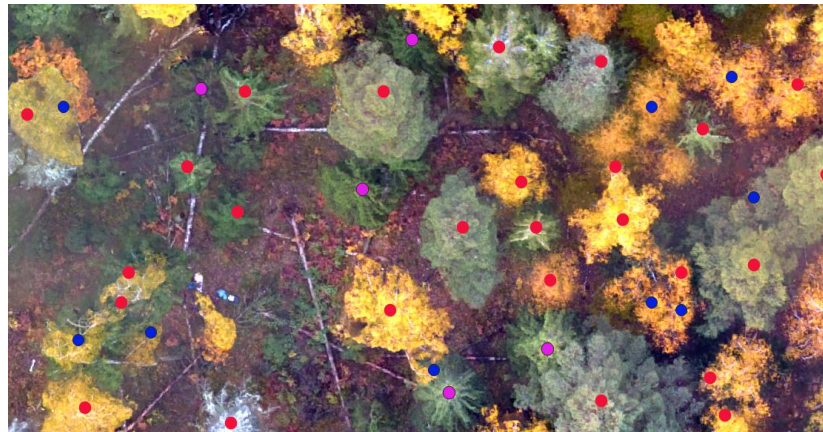
# Изменение формы кроны отдельных деревьев с течением времени в результате конкуренции



Плоские фигуры, формирующие осесимметричные тела для представления видоспецифичных форм крон:

**2 – вертикально-асимметричный эллипсоид (сосна)**, 3 – полуэллипсоид (берёза), 4 – составной конус (ель).

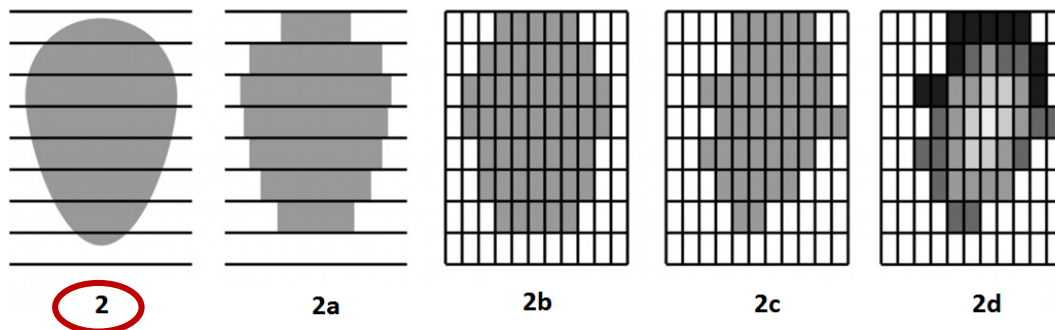
CW – ширина кроны в самой широкой её, CL – протяжённость кроны в вертикальном направлении. Воспроизведено по (Shanin et al., 2020).



Схематическое изображение алгоритма построения фактической формы кроны (на примере вертикального сечения кроны, не проходящего через ствол):

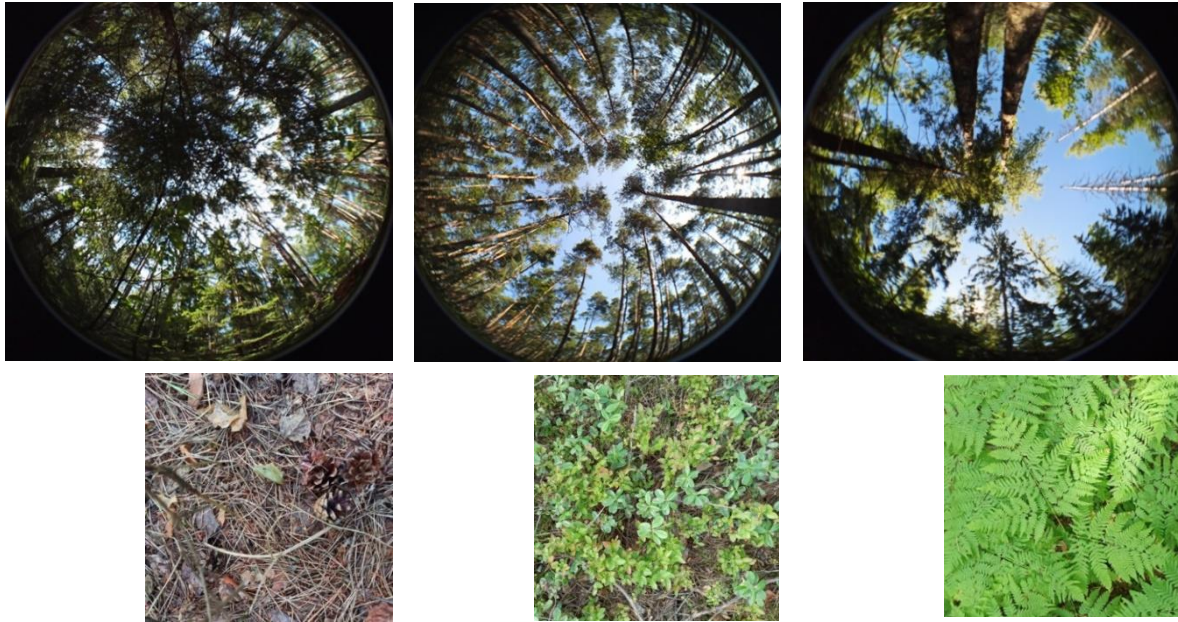
1 – базовая форма кроны; 2 – разделение кроны на горизонтальные слои; 3 – аппроксимация кроны трёхмерными ячейками; 4 – модификация формы кроны в горизонтальном направлении в соответствии с асимметричным конкурентным давлением со стороны соседних деревьев; 5 – распределение надземной биомассы между ячейками.

Воспроизведено по (Shanin et al., 2020)

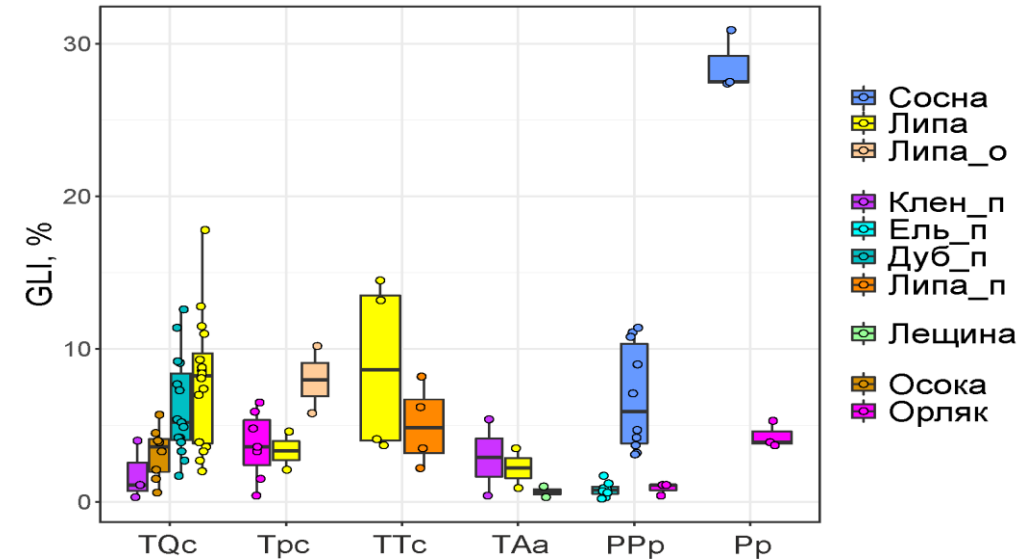
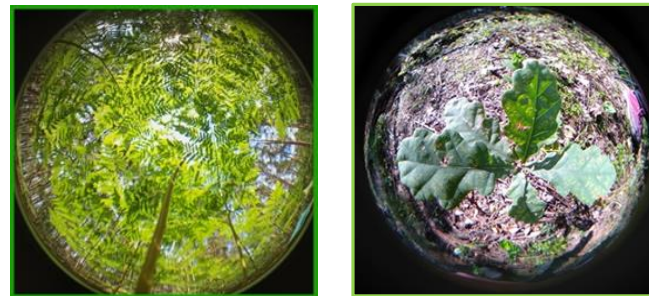




# Пропускание света пологом разных ярусов лесных фитоценозов



Полусферическая съемка под пологом древостоя и видами напочвенного покрова выполнялась в пасмурную погоду смартфоном Xiaomi Redmi Note 8 Pro с объективом-адаптером Arxhel 195° Fisheye Lens с последующим вычислением коэффициента пропускания света GLI (Фролов и др., 2019).

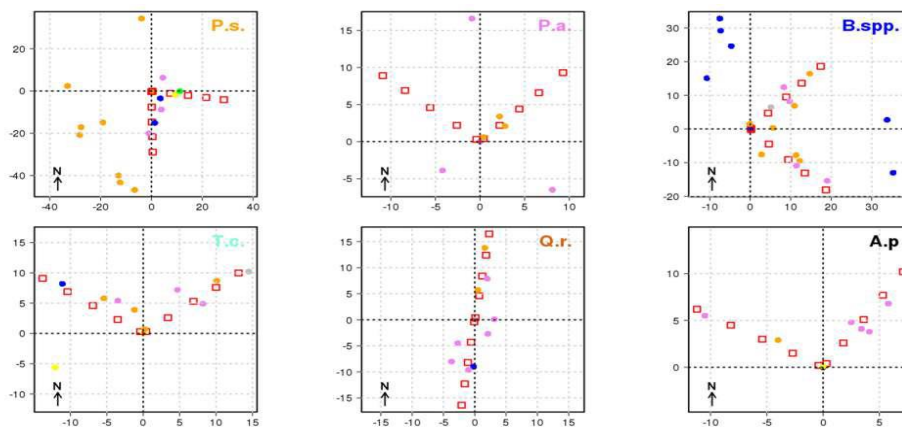


Доля пропущенной ФАР под пологом разных ярусов лесного покрова: оценки методом полусферической съемки с расчетом GLI (global light index).

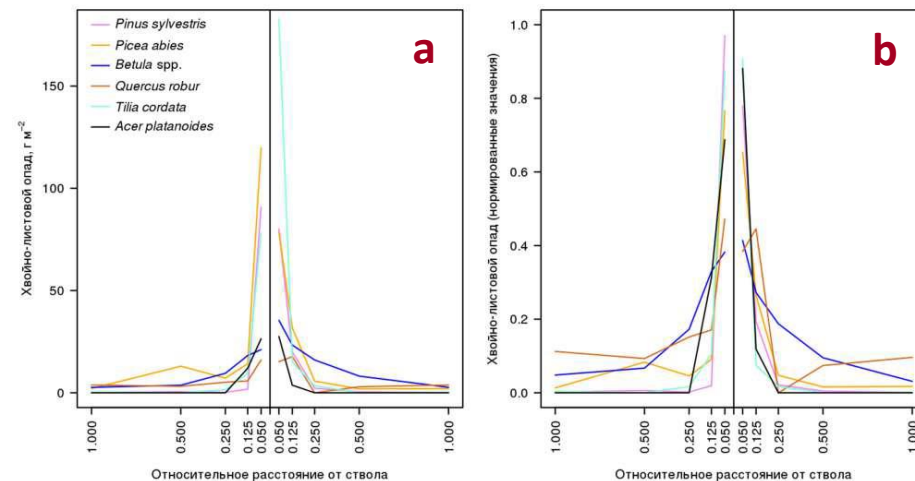
# Пространственное распределение поверхностного опада древостоя



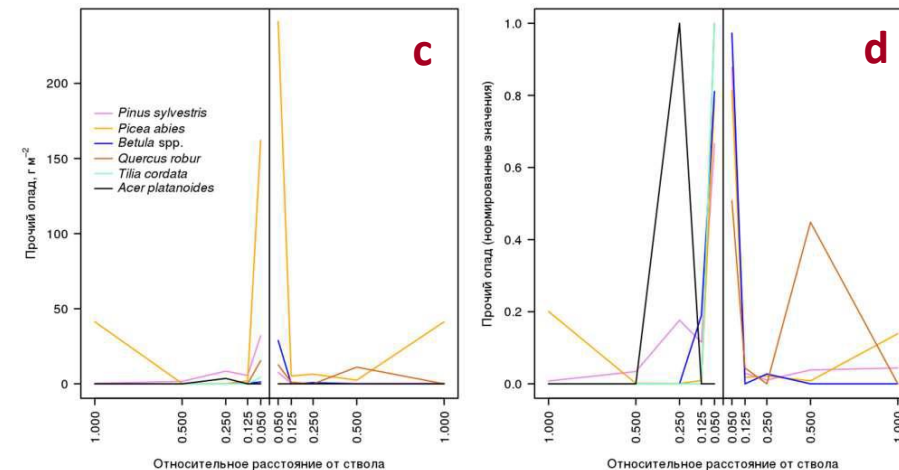
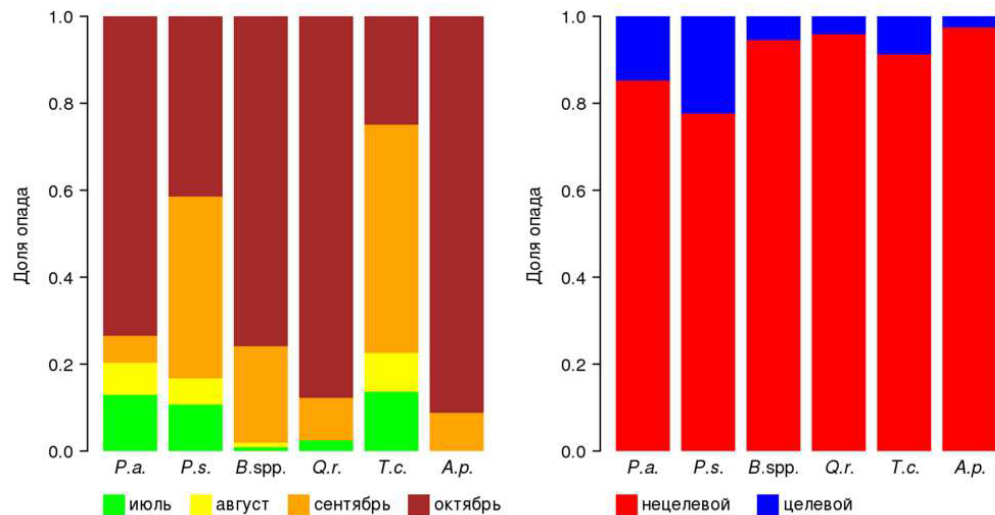
Размещение опадоуловителей на трансектах



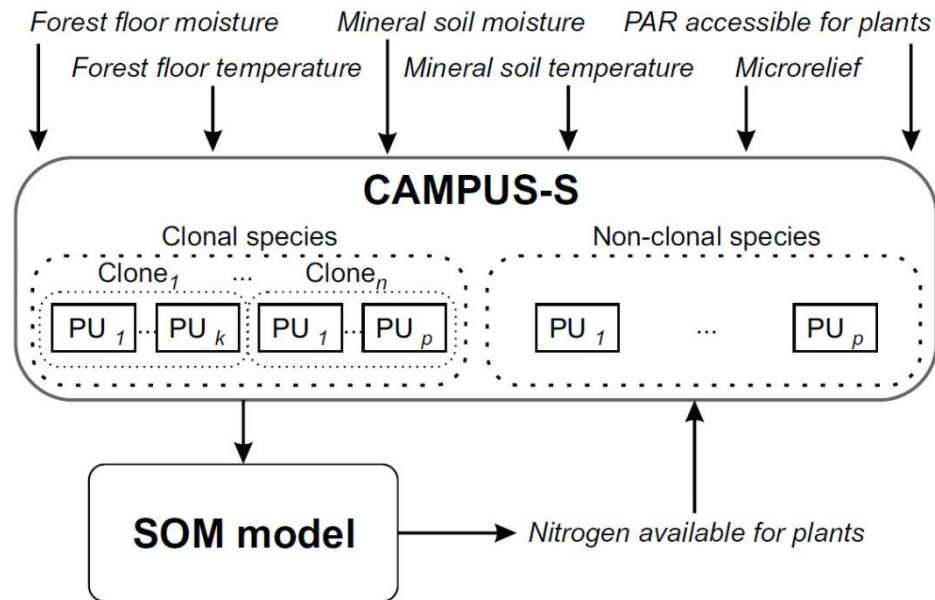
Распределение хвойно-лиственного (a, b) и нелиственного (ветви, кора, шишки и пр. – c, d) опада разных видов в абсолютных единицах (a, c) и нормированных значениях (делённых на сумму для всей трансекты – b, d)



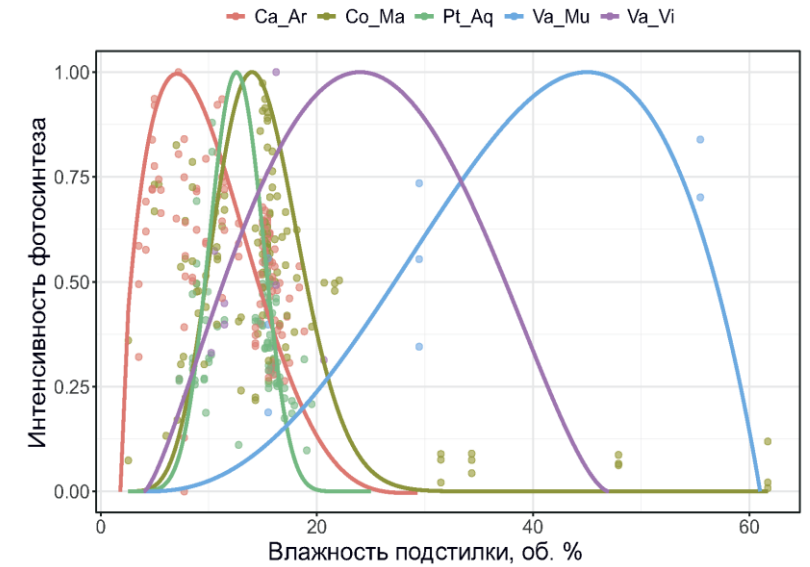
Распределение хвойно-лиственного опада по месяцам для разных видов (слева) и соотношение между целевым (соответствующего вида) и нецелевым (других видов) опадом (справа).



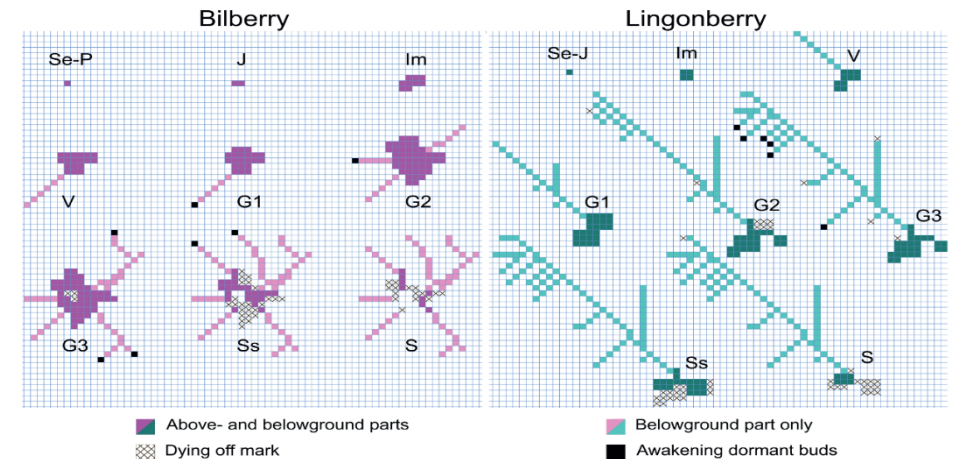
# Популяционная динамика и продуктивность растений травяно-кустарничкового яруса: модель CAMPUS-S



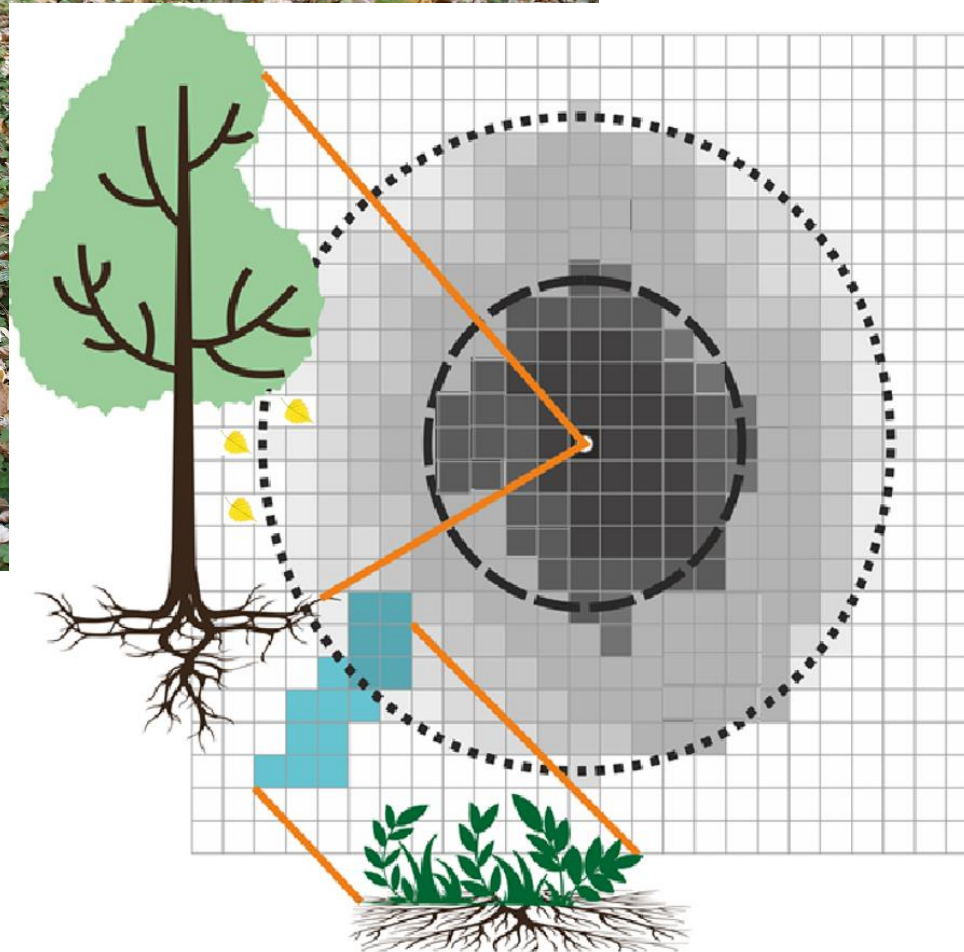
Зависимость интенсивности фотосинтеза разных видов ТКЯ от влажности лесной подстилки (точки - измеренные значения, линии показывают нелинейную регрессию)



Блок-схема модели CAMPUS-S и пример онтогенетических схем разрастания черники (Billberry) и брусники (Lingonberry)



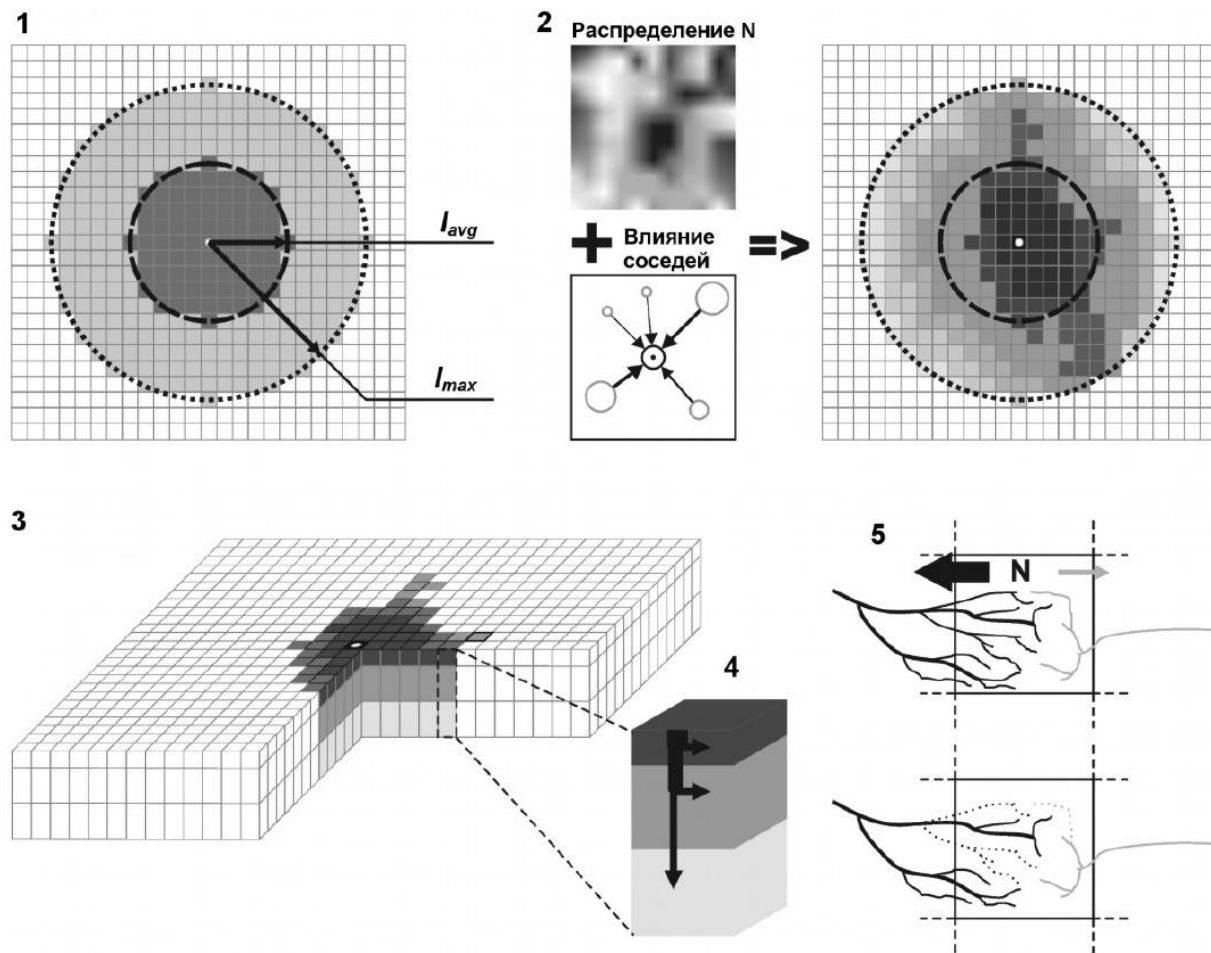
## Неоднородность распределения растительного опада на поверхности почвы



Пример «мозаики» распределения ежегодного поверхностного опада древесного и травянисто-кустарничкового ярусов, формирующего фракцию L органического горизонта почвенной модели **Romul\_Hum**.

Градации серого – разное количество (масса) листового опада отдельного дерева; голубым цветом – лиственной опад клона кустарничка.

# Конкуренция между растениями за минеральный азот в почве



Блок-схема алгоритма годового шага модели конкуренции за доступный азот почвы:

1 – расчёт площади зоны корневого питания на основе  $I_{avg}$  (тёмно-серая область) и определение всех ячеек, которые потенциально могут быть включены в зону питания, на основе  $I_{max}$  (светло-серый); 2 – расчёт параметра предпочтительности для каждой ячейки в потенциальной зоне питания с учётом неоднородности распределения ресурса и конкурентного давления со стороны соседних деревьев; 3 – включение ячеек в зону корневого питания, при этом биомасса тонких корней распределяется между ячейками в соответствии со значениями  $r_x, y$ ; 4 – расчёт вертикального распределения биомассы корней в каждой ячейке; 5 – расчёт поглощения азота в доступных для растений формах в соответствии с биомассой тонких корней каждого конкурирующего дерева. Воспроизведено по (Shanin et al., 2015).

## Заключение

---

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ РАССМАТРИВАЮТСЯ КАК ПЕРЕДОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАряду с такими лидерами как БЛОКЧЕЙН, КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, УГЛЕРОДНЫЕ ТРУБКИ И ДР.

В ОТЛИЧИЕ ОТ ТАКИХ ОБЛАСТЕЙ КАК СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСАМИ И ЛЕСНЫМИ РЕСУРСАМИ ЗАПРОС НА СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЕЩЕ НЕ СФОРМИРОВАН

ТЕМ НЕ МЕНЕЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ МОГУТ НАЙТИ ПРИМЕНЕНИЕ КАК ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОММЕРЧЕСКИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

An aerial photograph of a dense forest. The trees are mostly green, with some showing yellow and orange hues, suggesting autumn. The canopy is thick and textured. The text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!" is overlaid in the center in a light green, bold, sans-serif font with a slight shadow and reflection effect.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

# машинное обучение

Машинное обучение – класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе решений множества сходных задач.

Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, нейросетей, теории вероятности, теории графов, различные техники работы с данными не обязательно в цифровой форме.