

PERM
SUMMER
SCHOOL

Углеродный баланс: Д33, Процессное Моделирование и ИИ

Пукальчик Мария
старший преподаватель Лаборатории Цифрового сельского хозяйства,
руководитель направления «Агро» ЦК НТИ «Интернет вещей»

Краткое содержание

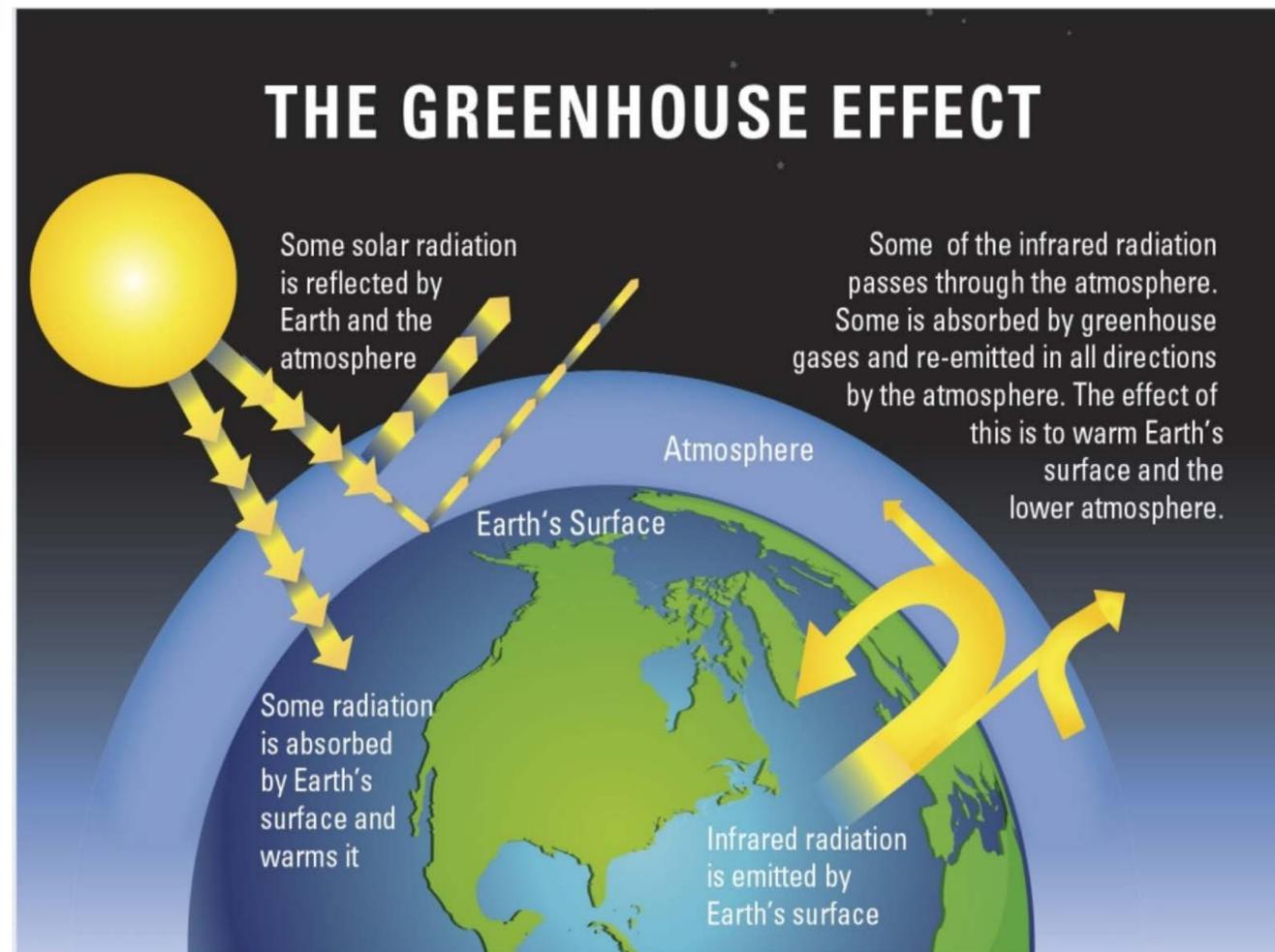
1. Реализация климатической повестки в РФ
2. Карбоновые полигоны: где, что, зачем?
3. Подходы к оценке углеродного баланса:
 - Дистанционные методы зондирования земли (ДЗЗ)
 - Процессные модели
 - Гибридные модели

Bio

- ❑ Кандидат биологических наук (МГУ им М.В. Ломоносова)
- ❑ Руководитель группы «Агро» ЦК НТИ «Беспроводная связь и Интернет вещей», Сколтех
- ❑ Старший преподаватель Лаборатории цифрового сельского хозяйства, Сколтех
- ❑ Tensor Fields, CEO
- ❑ Специалист в области применения машинного обучения, ИИ и компьютерного зрения для сельского хозяйства
- ❑ Работала пост доком в Чешском университете естественных наук (Прага) в области оценки качества окружающей среды
- ❑ Автор более 59 рецензируемых научных публикаций



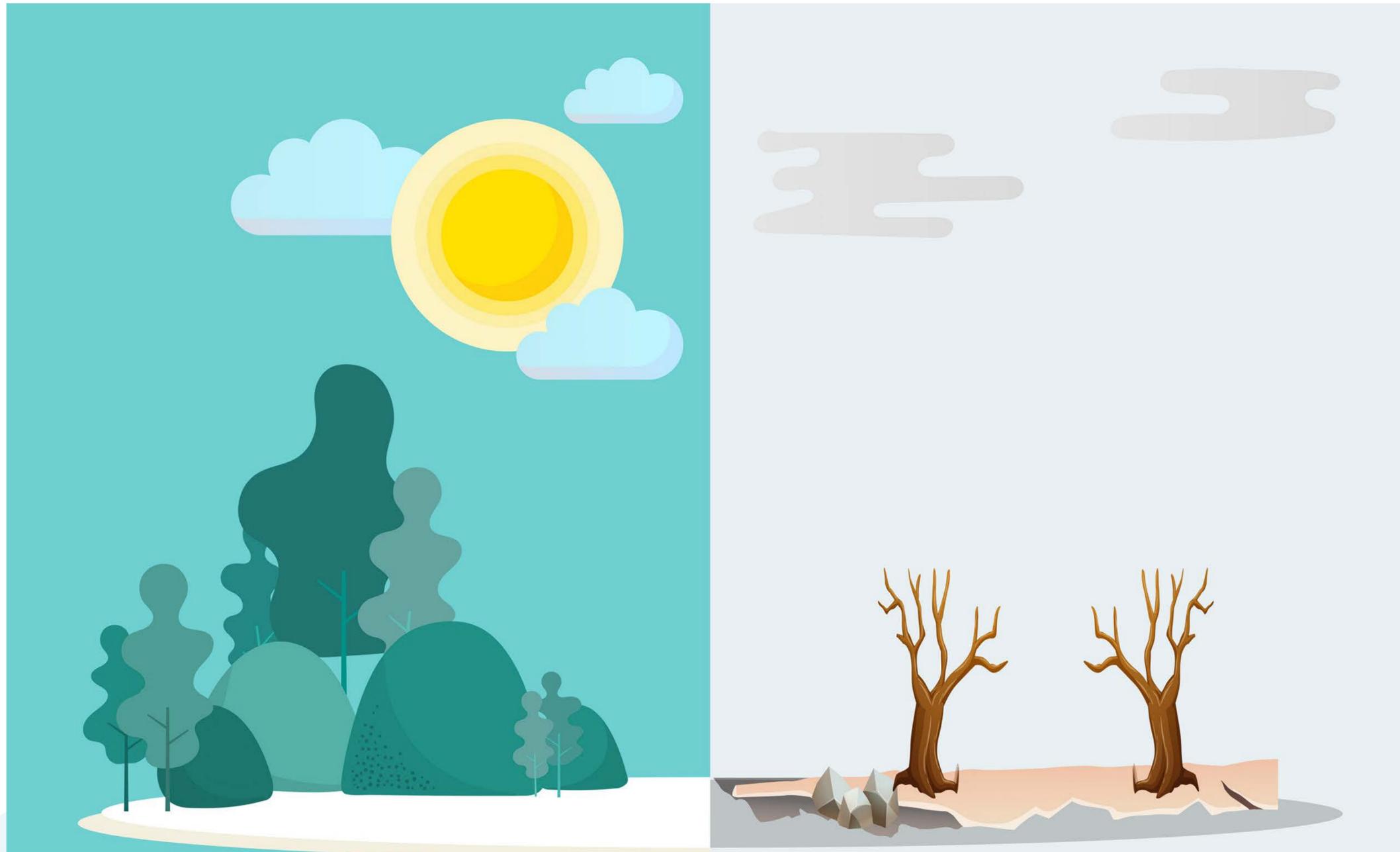
Глобальное изменение климата



- ❑ В период 1880–2012 годов средняя глобальная температура повысилась на 0,85 °С
- ❑ Средняя глобальная температура прямо зависит от концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере Земли
- ❑ С начала индустриальной эпохи концентрация ПГ постоянно увеличивается
- ❑ Основные ПГ – H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3

* Источник: [The Royal Society: Basics of Climate change](#)

Последствия глобальное изменение климата



Меры борьбы: глобальные соглашения



Основные документы

- ❑ ФЗ “О ратификации рамочной конвенции ООН об изменении климата” №34-ФЗ от 04.11.1994
- ❑ План реализации комплекса мер по совершенствованию государственного регулирования выбросов парниковых газов и подготовки к ратификации Парижского соглашения (распоряжением от 3 ноября 2016 г. № 2344-р)
- ❑ Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации
- ❑ Распоряжение Правительства РФ от 25 декабря 2019 г. № 3183-р Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г.
- ❑ Указ Президента Российской Федерации от 8 февраля 2021 № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений»
- ❑ Приказ Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса»

Меры борьбы – что значит для РФ



РФ приняла обязательства снизить выбросы парниковых газов к 2030 году на 25 % по сравнению с уровнем 1990 года. Установлены пороговые значения – лимиты выбросов для территории.

Разрабатывается стратегия перехода на без-углеродную экономику. Проект на рассмотрении совместно с ФЗ № 1116605-7 “Об ограничении выбросов парниковых газов”

Рассматривается создание национальной системы расчета углеродного бюджета для РФ – как окно входа на рынок углеродных единиц

Бизнес vs Меры борьбы

Торговля квотами на эмиссии парниковых газов (emissions trade systems/schemes, **ETS**) – рыночный инструмент снижения выбросов парниковых газов в атмосферу.

Разработка проекта **Европейского закона о климате** (European Climate Law). Он вводит: трансграничный **углеродный налог Евросоюза на импорт** (EU carbon border tax) – таможенные пошлины на «углеродный след» импортируемой в Европу продукции и сырья из стран, не имеющих углеродного регулирования.

“Слепые зоны” как обоснование для разработки

1. В России действующая ETS не запущена.
2. В странах, где ETS не внедрены, необходима оценка текущего “бюджета”, разработка системы верификации (*получение аккредитации для верифицирующх структур)

Карбоновые полигоны в РФ

Экспертным советом при Министерстве науки и высшего образования РФ по вопросам развития технологий контроля углеродного баланса утверждены программы развития карбоновых полигонов в регионах, являющихся участниками пилотного проекта Минобрнауки России*



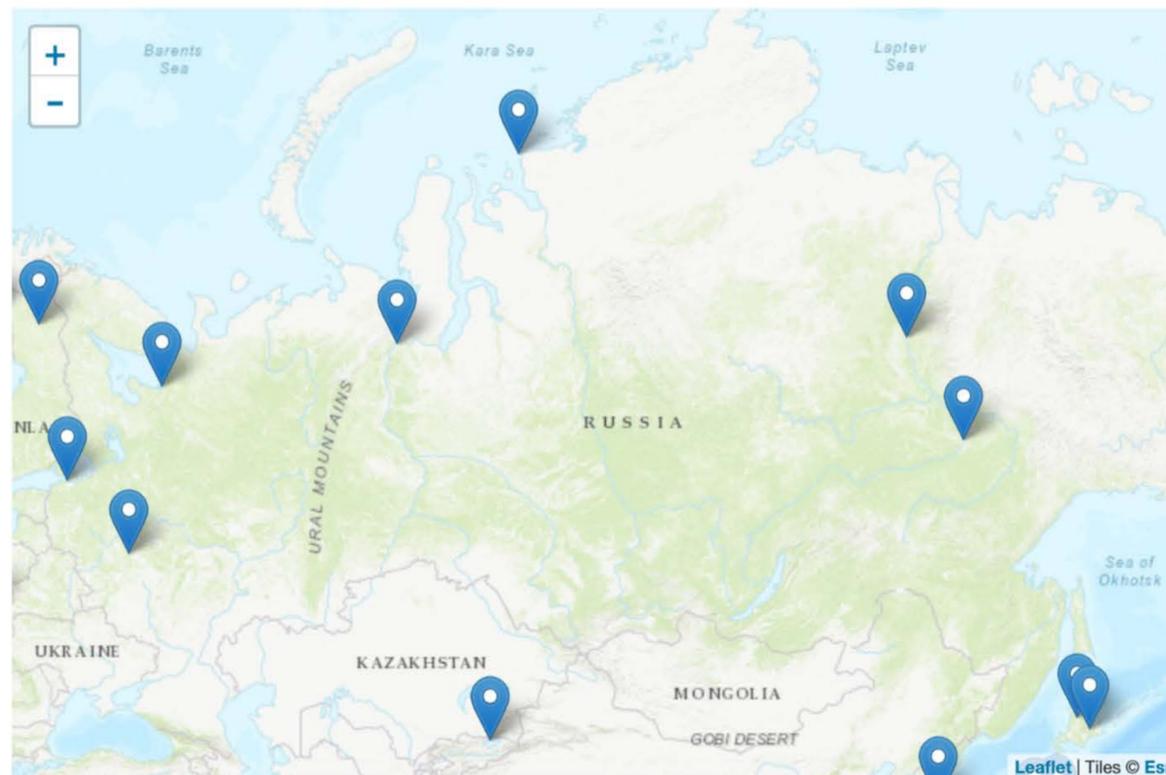
* Заседание от 15 июля 2021 года

Климатические исследования в РФ

Открытые данные международной Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (NDACC)

Measurement Stations

Select a station on the map or in the list to access its public data.



Filter by:

HEMISPHERE

- Northern Hemisphere
- Southern Hemisphere

LATITUDINAL BAND

- Subtropics and Tropics
- Mid Latitude
- High Latitude

INSTRUMENT STATUS

- Active
- Inactive
- Campaign

INSTRUMENT

- Brewer
- Dobson
- FTIR Spectrometer
- Lidar
- Microwave Radiometer
- Sonde
- UV Spectroradiometer
- UV/Visible Spectrometer

Clear all

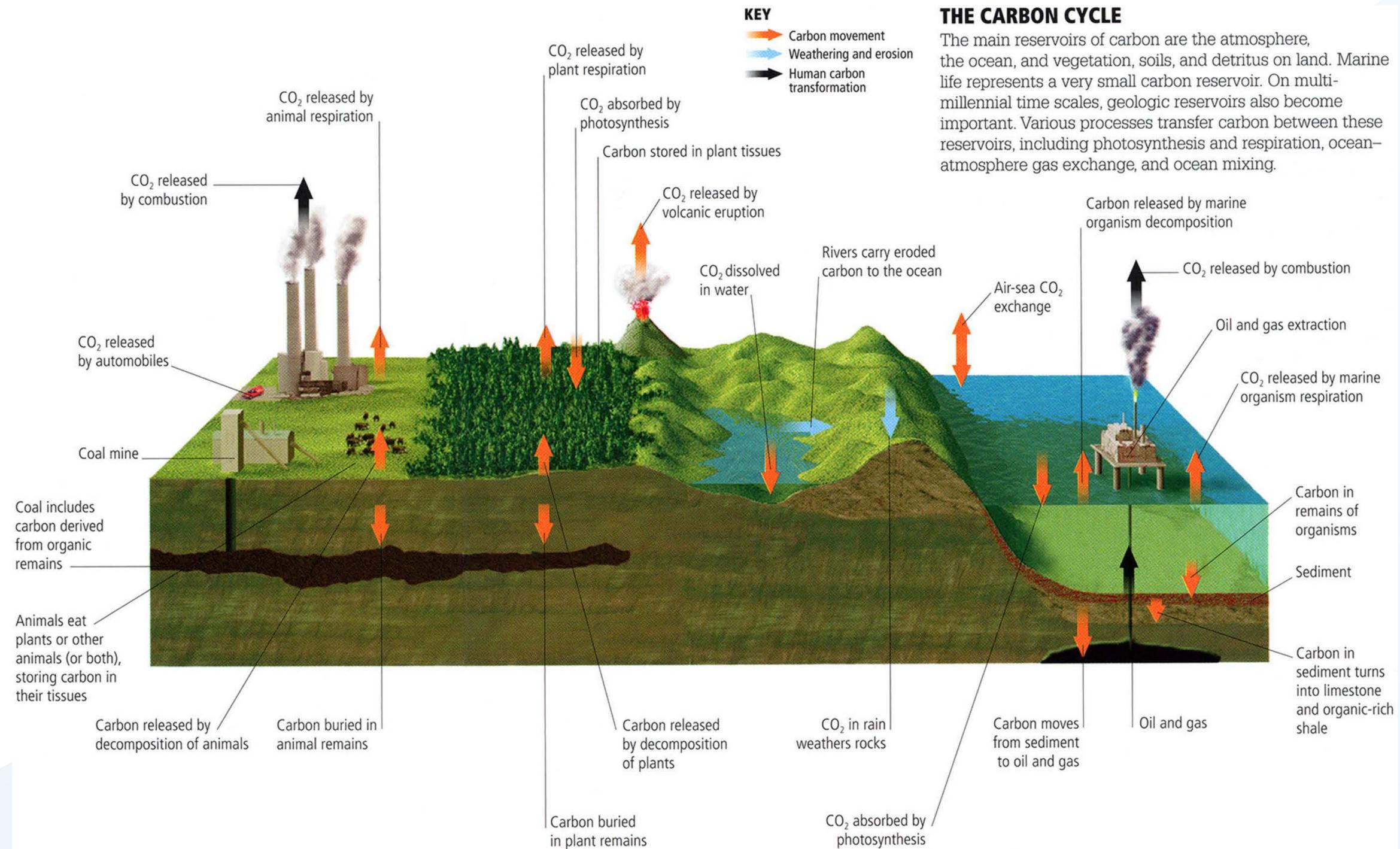


Станции мониторинга, данные с которых обобщаются в отчетах Росгидромета: Териберка, Новый порт, Тикси, Санкт-Петербург, Обнинск + вышки проекта Fluxnet

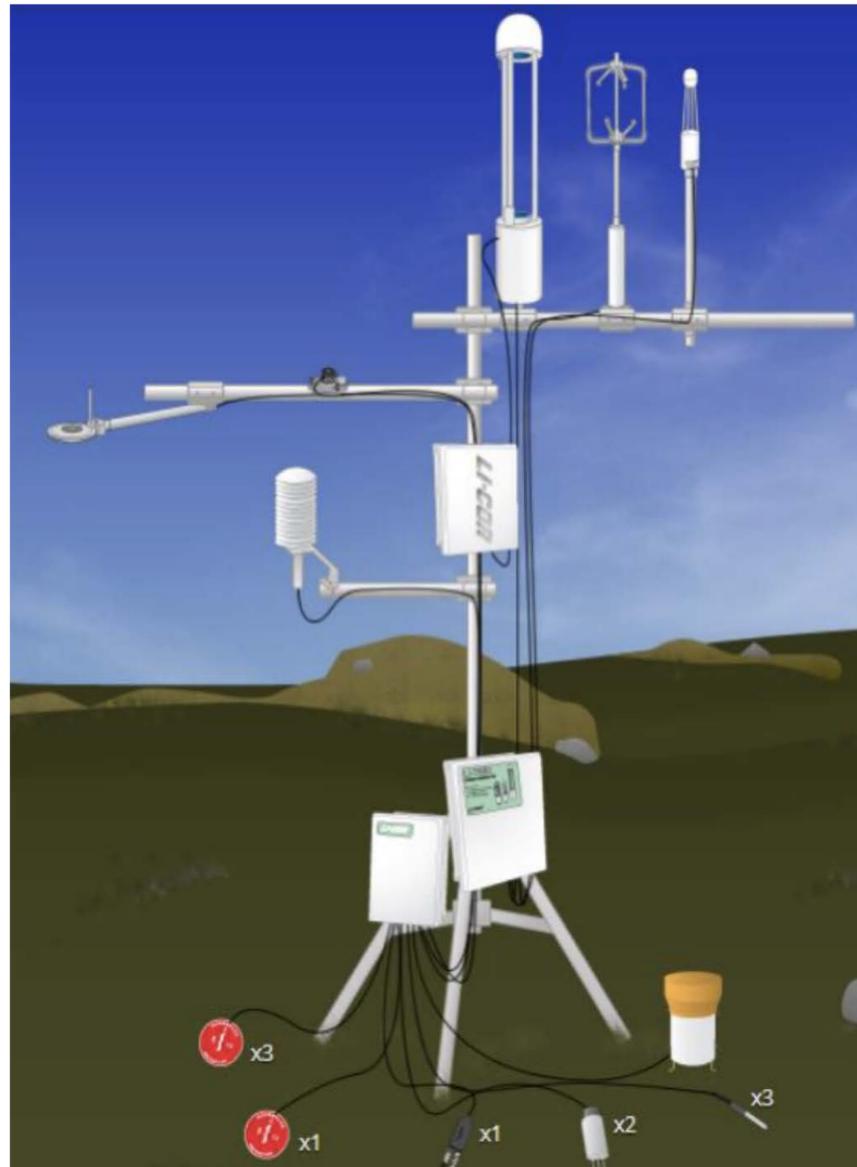
Общая стратегия и этапы запуска климатических проектов



Глобальный цикл углерода: основные пулы и потоки



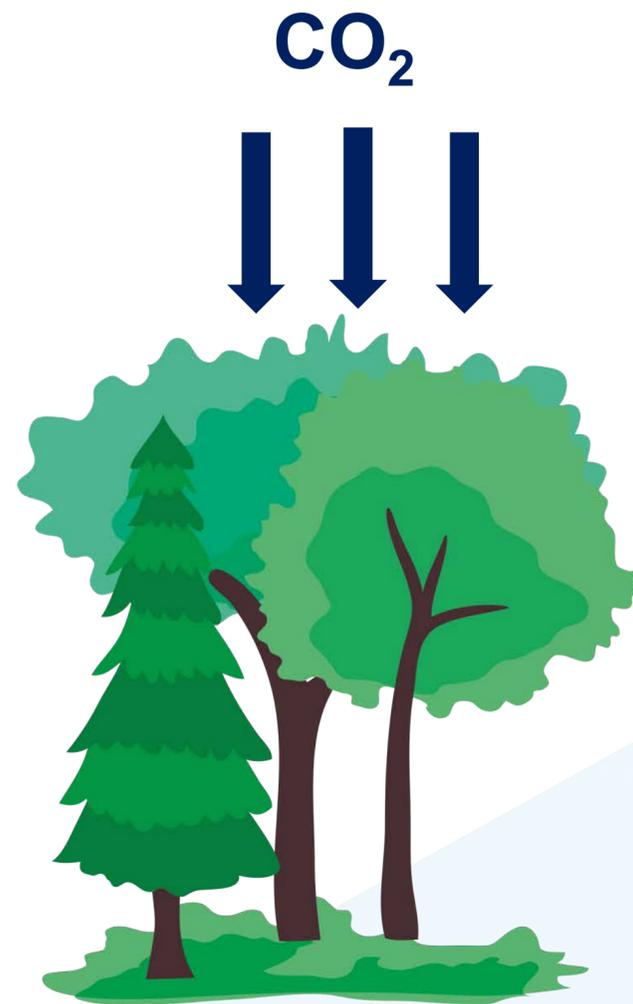
Элементы системы мониторинга (на примере проекта Fluxnet)



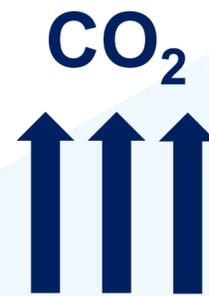
- ❑ Пульсационные измерения потоков ПГ
- ❑ Радиационный баланс – пиранометры и балансомеры на основе термоэлементов
- ❑ Коротковолновая радиация и ФАР: LI-200, LI-190SA, LI-191R
- ❑ Поток тепла в почву – диски и термометры
- ❑ Фотосинтез: LI-6400/XT
- ❑ Поток CO₂ из почвы: LI-8100/A, LI-8150
- ❑ Листовой индекс: LI-3000C, LAI-2200

Источник: Бурба, Г. Г., Курбатова, Ю. А., Куричева, О. А., Авилов, В. К., & Мамкин, В. В. (2016). Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. Москва: ИПЭЭ им. АН Северцова РАН.

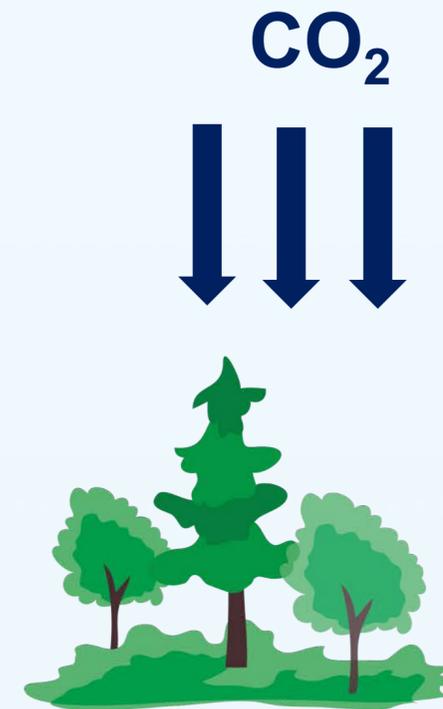
Лесные системы и бюджет углерода



Лес

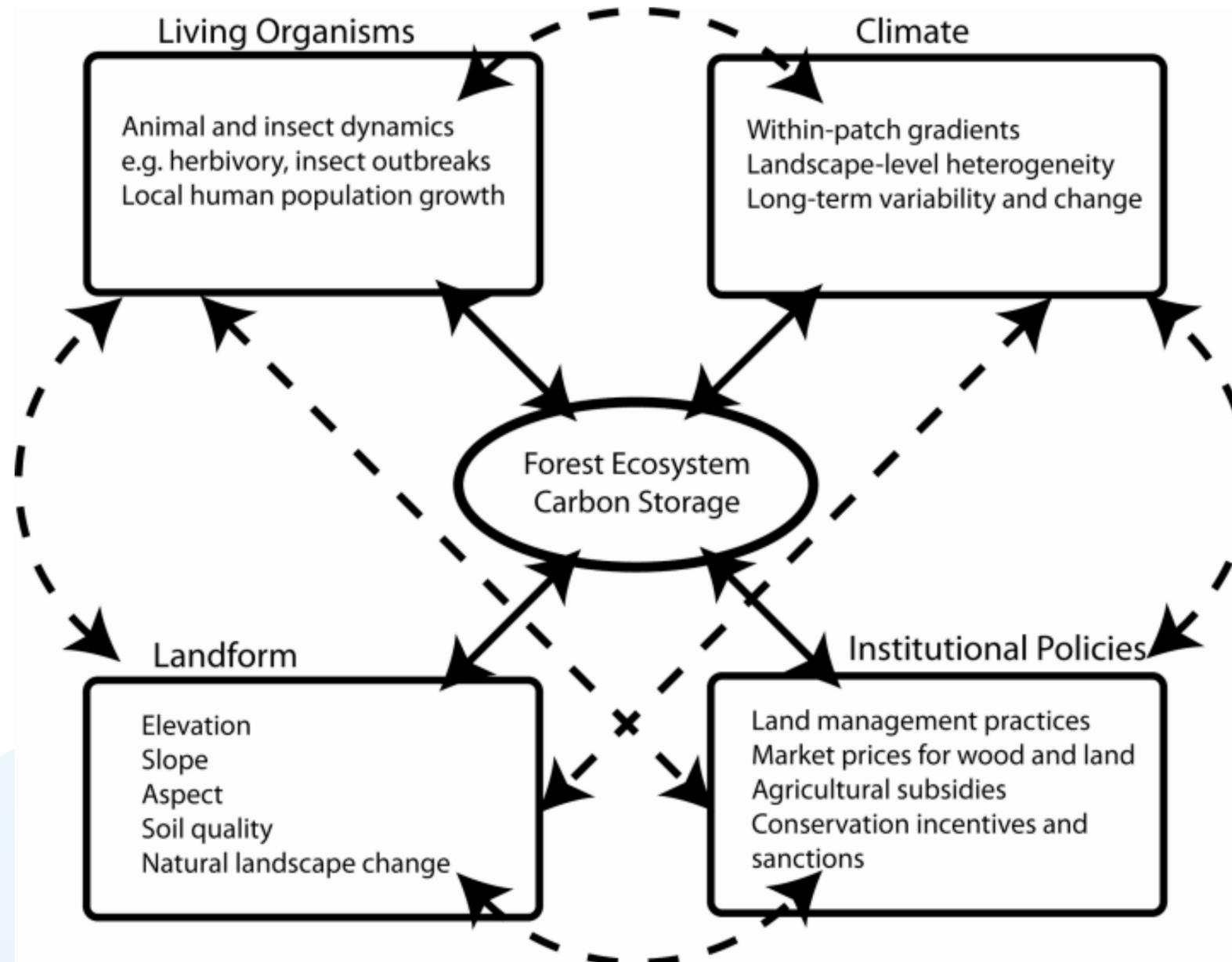


Вырубка/
Остатки деревьев

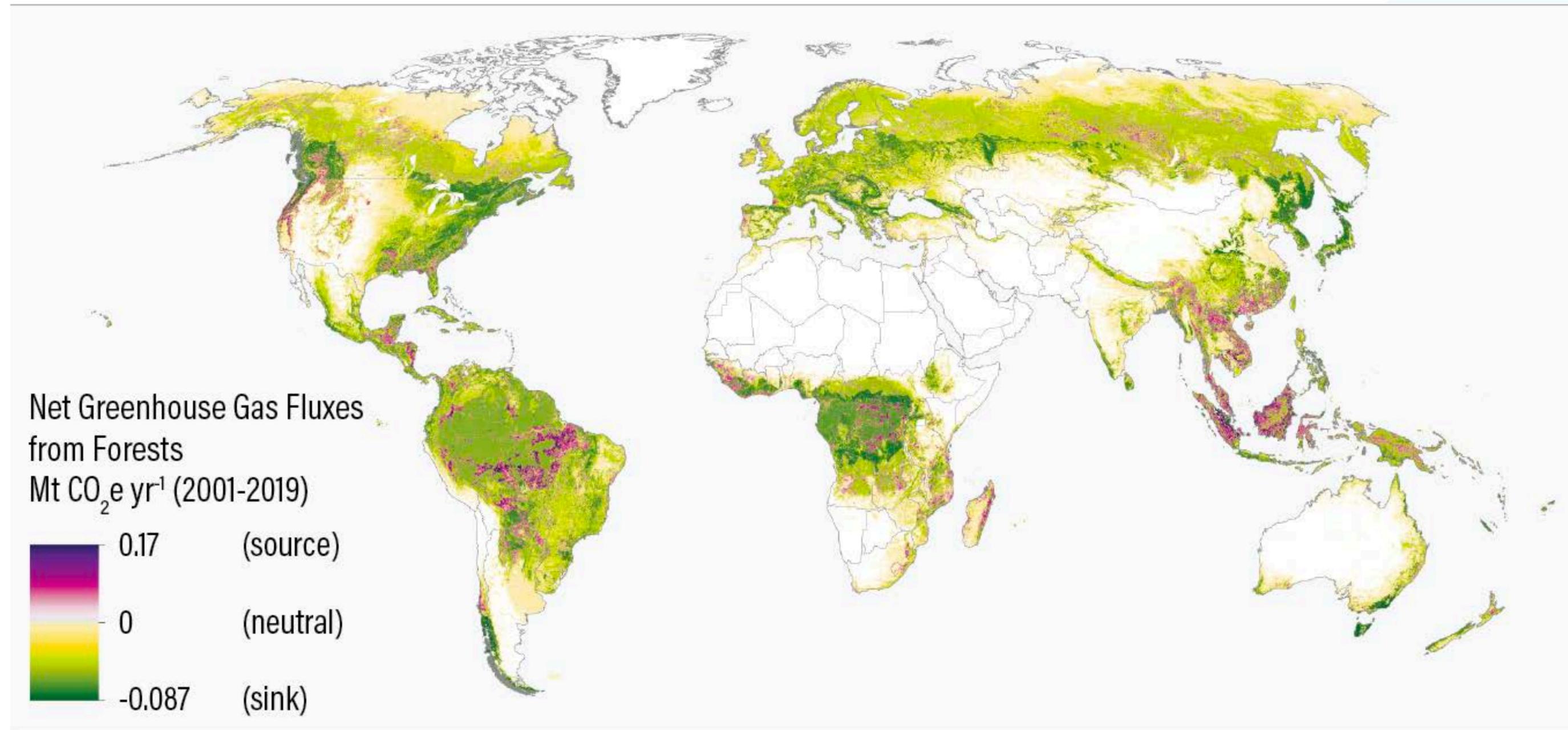


Поросль/
лесопосадка

Лесные системы и бюджет углерода

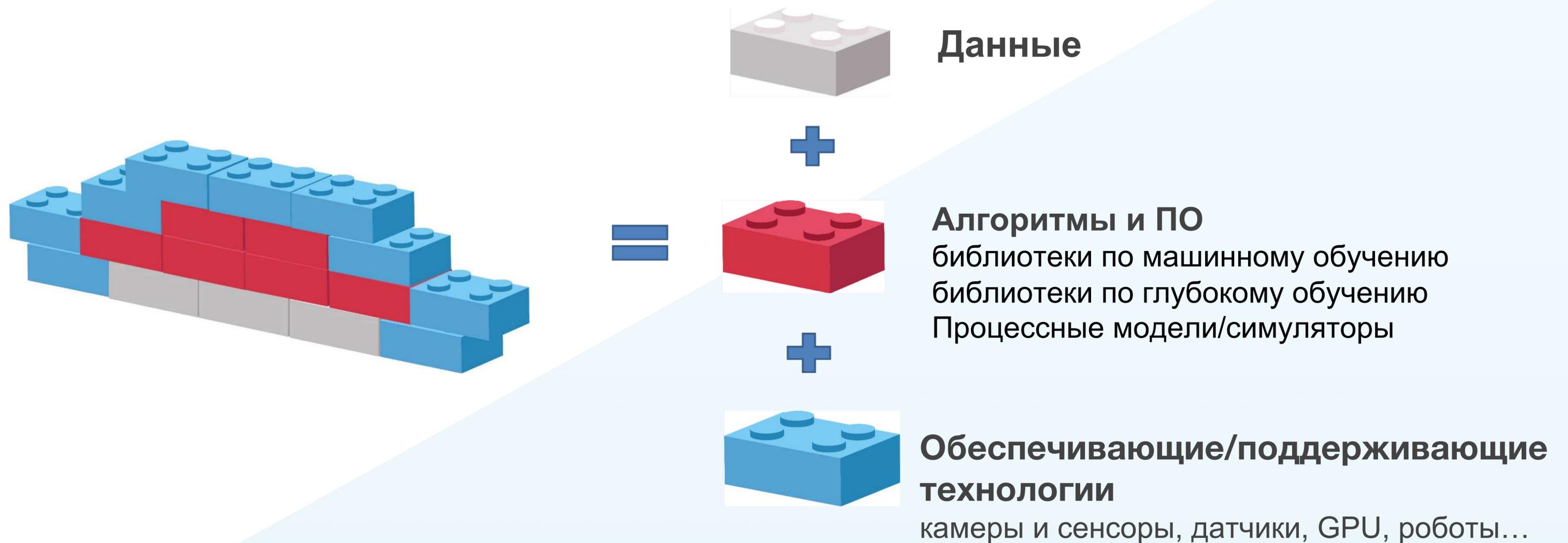


Лесные системы и бюджет углерода



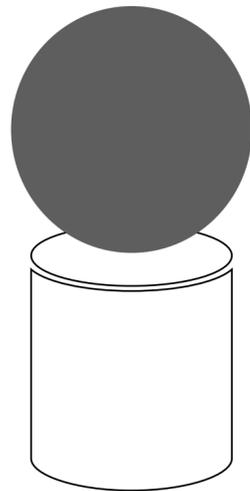
Источник: Harris, N.L., Gibbs, D.A., Vaccini, A. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 234–240 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>

Карбоновые полигоны как фабрика данных

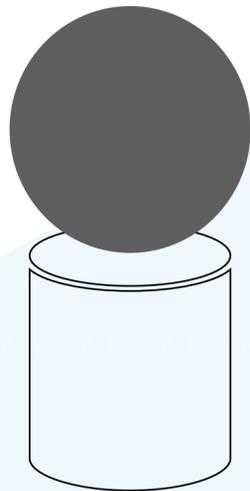


Традиционная операционная система работы с данными

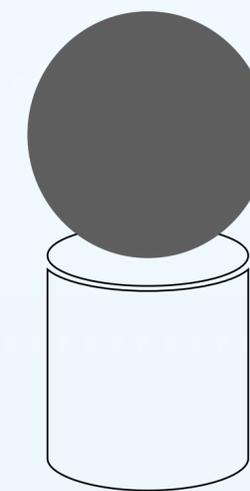
Традиционно, группы ученых собирают данные *непоследовательно, разделяя и изолируя* их в хранилища по подразделениям и благодаря используемым узкоспециальным приложениям и ИТ-системам.



Хранилище 1

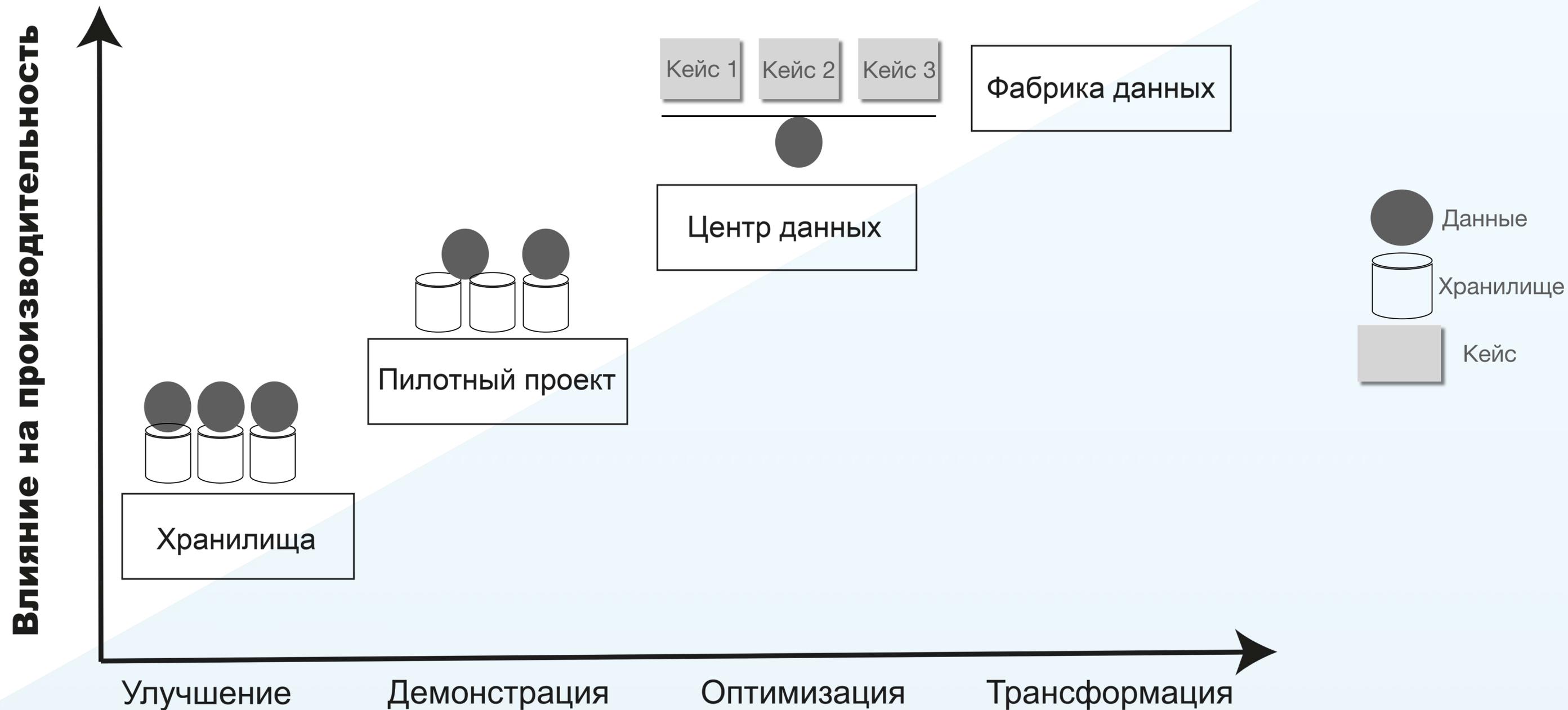


Хранилище 2

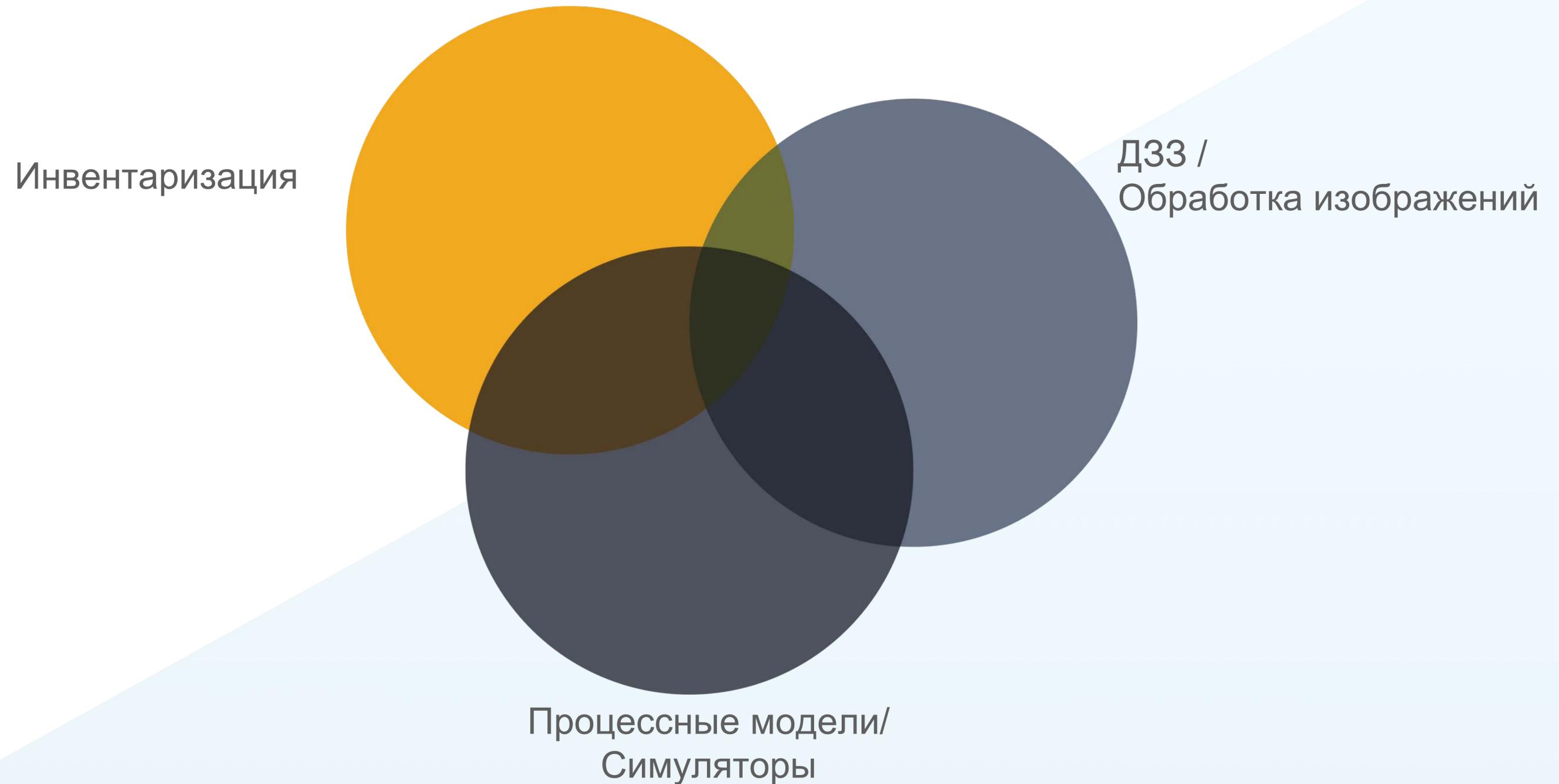


Хранилище N

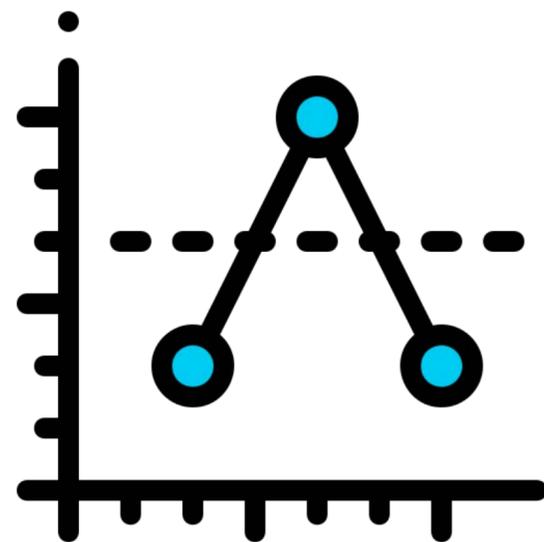
Этапы преобразований модели работы с данными



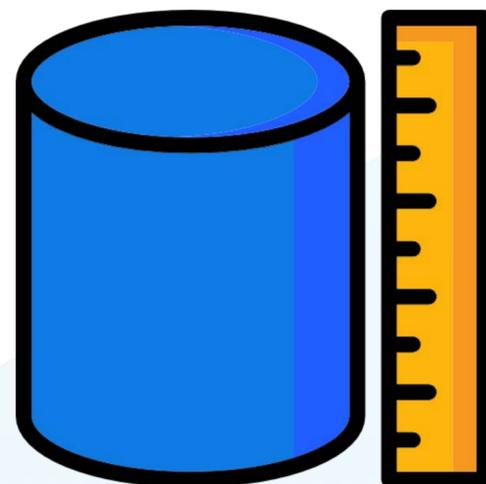
Методики оценки бюджета углерода



Инвентаризационные методы оценки бюджета углерода



Оценка средней биомассы



Объемный метод



Регрессионные подходы по оценке биомассы отдельных деревьев

Инвентаризационный метод оценки: use case

Входные параметры	Модель	Output
<p>Тип леса, свойства деревьев (диаметр, S, среднее количество деревьев на испытанном участке, высокая, плотность древесины, содержание углерода в древесине)</p> <p>Почва: содержание углерода в почве (литературные данные)</p>	<p>Инвентаризационные исследования + линейные регрессии</p>	<p>Нетто углеродный след биомассы</p> <p>Нетто углеродный след почв</p> <p>Total carbon uptake = total carbon uptake (forest + soil)</p>



Инвентаризационный метод оценки: use case

Запас древесины лесных насаждений на 1 га, определенный в соответствии с п.107, а именно:

$$M = K \cdot G \cdot (3 + H)$$

M - запас древесины на 1 га, м³;

K – поправочный коэффициент, для сосны, лиственницы, березы, осины, ольхи серой, липы, дуба и граба равен 0,4, для остальных деревьев - 0,44;

G – среднее арифметическое от натуральных измерений диаметров ствола на 1Га, м²;

H - средняя высота деревьев в лесопосадке, м.

$$G = J \cdot \sum_{i=1}^l G_i = J \cdot \sum_{i=1}^l \frac{\pi \cdot (d_i)^2}{4} = \frac{\pi \cdot J}{4} \sum_{i=1}^l (d_i)^2$$

Инвентаризационный метод оценки: use case

$$G = J \cdot \sum_{i=1}^l G_i = J \cdot \sum_{i=1}^l \frac{\pi \cdot (d_i)^2}{4} = \frac{\pi \cdot J}{4} \sum_{i=1}^l (d_i)^2$$

$J=250$ - коэффициент пересчета натурной площади на одном эталонном участке в натурную площадь на 1 га 1 ha (10000 m²/40m²);

l – количество деревьев на эталонном участке, шт;

G_i - площадь поперечного сечения i -го ствола дерева, m²;

d_i - диаметр ствола i дерева, м;

h_i – высота i дерева, м.

Carbon absorption by soils: use case

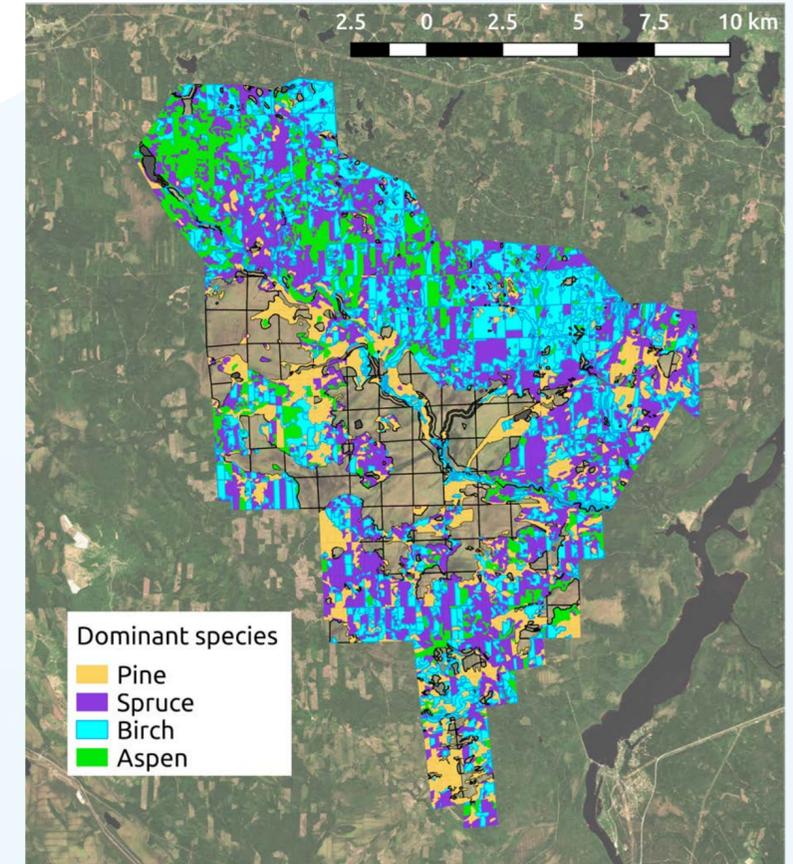
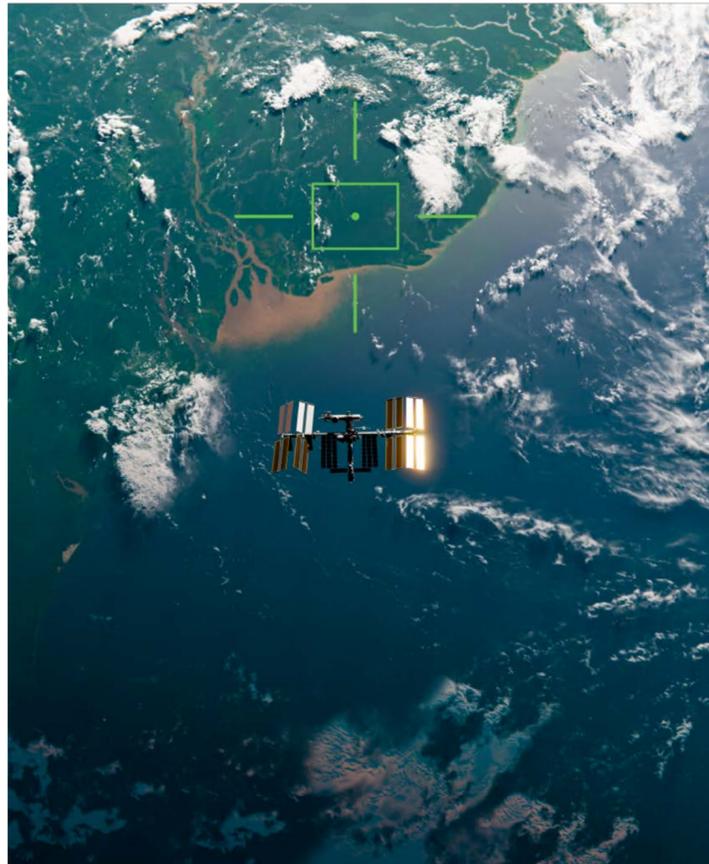
Для расчета используется информация о типе почвы и времени, прошедшем с момента прекращения обработки пахотной почвы.

В основу расчета почвенного углерода для серой лесной почвы легла формула (Таблица 1, стр.364, Курганов и др., 2010):

$$BS = -60 \ln(Y) + 261$$

BS - скорость накопления углерода в слое почвы 0-20 0-20см, gC/m² year
Y – время, прошедшее с момента прекращения обработки почвы.

ДЗЗ и обработка изображений



Моделирование потоков ПГ из различных экосистем (примеры)

Yasso, ROMUL, DNDC, MONICA, DAYCENT – для оценки компонентов биогеохимического цикла и симуляции потоков углерода и азота между атмосферой, растениями и почвой для территорий **пашни**

CENTURY – для симуляции динамики CNPS для **различных систем** почва-растения

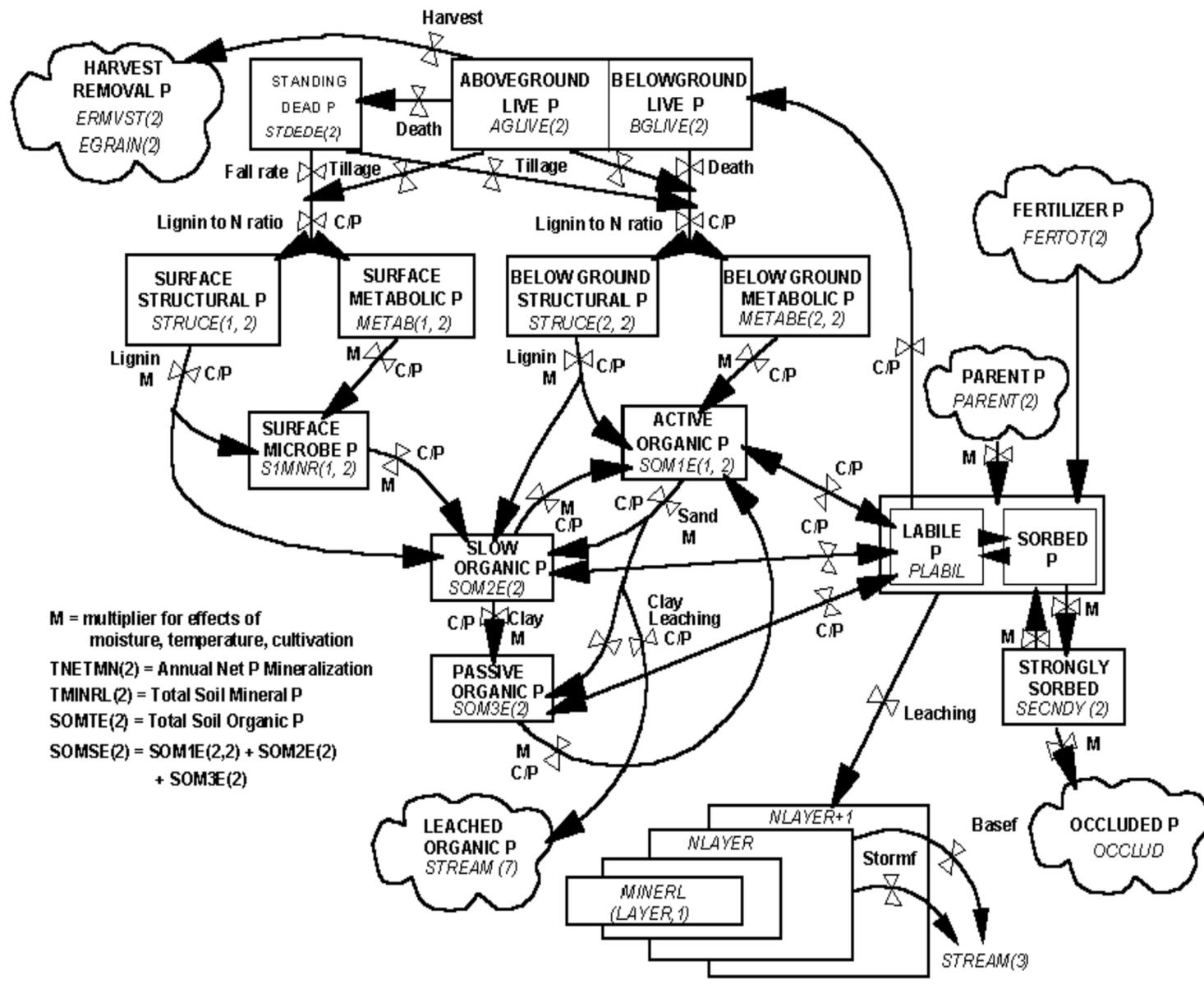
Forest-DNDC, SOMM, RothC – для симуляции динамики CN в **лесных экосистемах**

Ограничения существующих моделей:

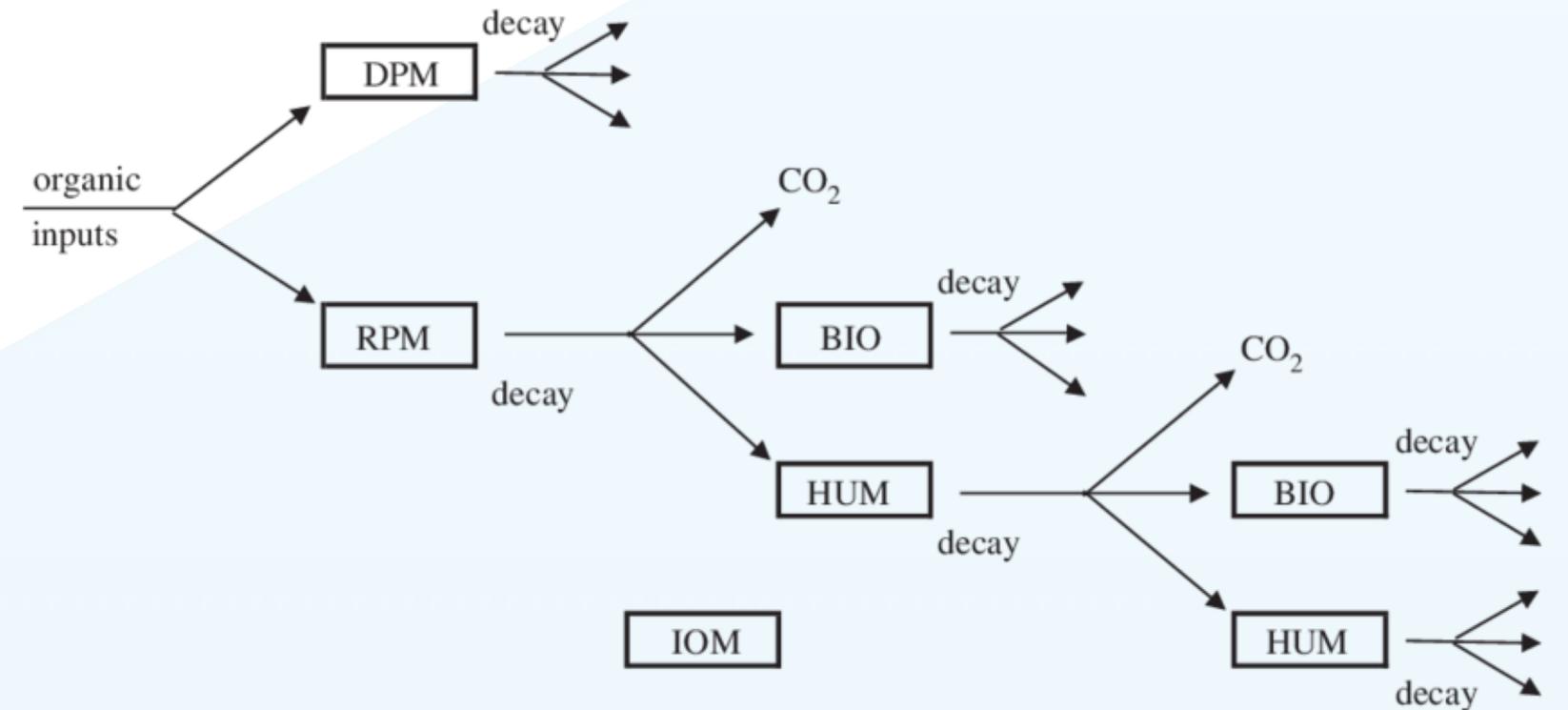
- ❑ степень их открытости
- ❑ язык программирования
- ❑ возможности для масштабирования и повышения вычислительной эффективности

Процесные модели

CENTURY biogeochemical model



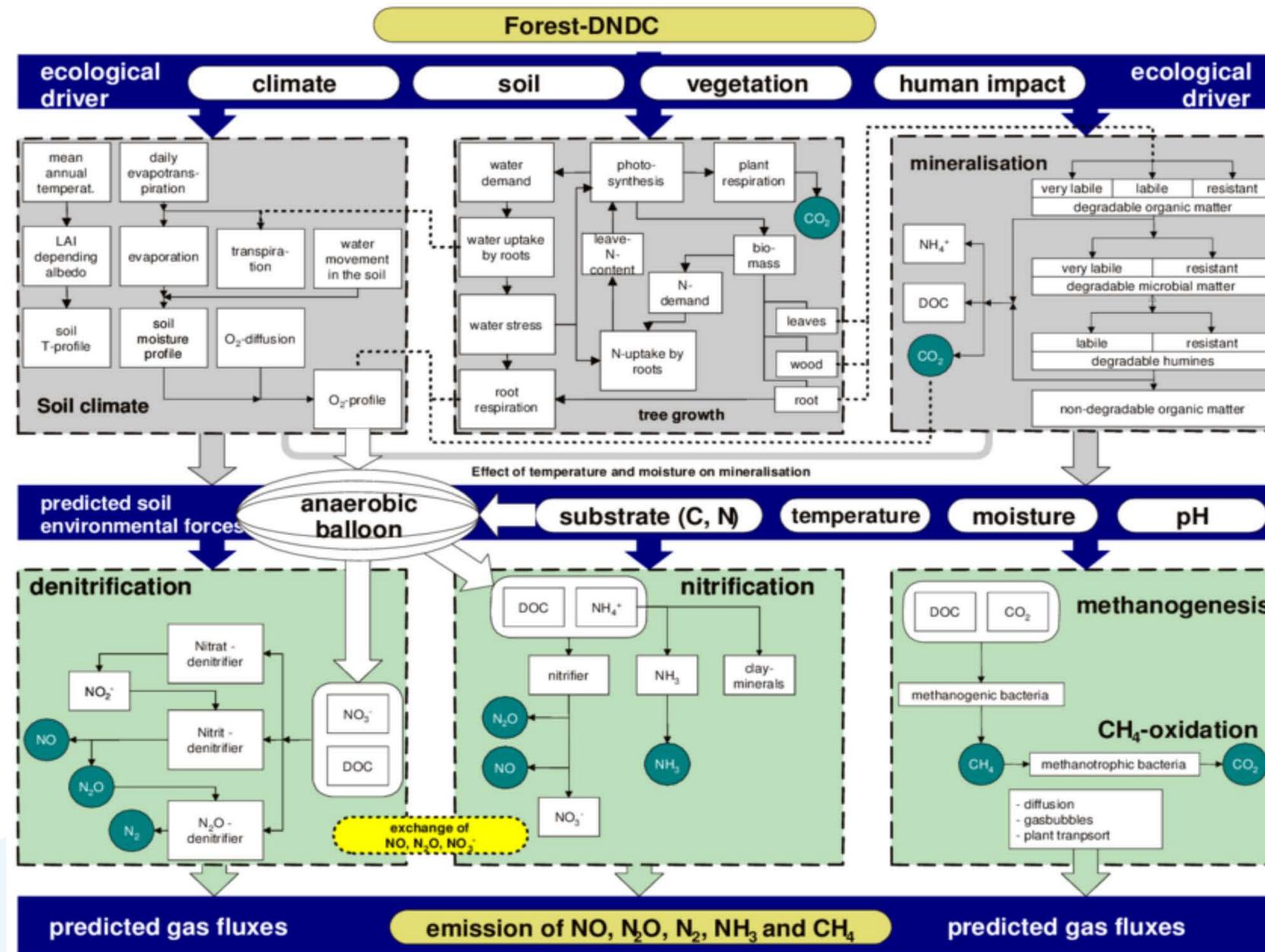
Rothmsted carbon (Roth C) model



	rate constants	turnover time is 1/rate constant
DPM : decomposable plant material	DPM : 10.00	DPM : 0.1 years
RPM : resistant plant material	RPM : 0.30	RPM : 3.3 years
BIO : microbial biomass	BIO : 0.66	BIO : 1.5 years
HUM : humified organic matter	HUM : 0.02	HUM : 50.0 years
IOM : inert organic matter		

DNDC-Forest simulation model

a computer simulation model for predicting forest production, soil carbon sequestration, and trace gas emissions in upland and wetland forested ecosystems



DNDC-Forest simulation model



Climate data	Hydrological data	Forest data	Soil data
<p>Latitude: The latitude (decimal unit) of site location;</p> <p>Atmospheric background CO2 concentration (ppm) : Atmospheric background CO2 concentration (default value is 350 ppm);</p> <p>Temperature - mean value for day in year.</p> <p>Precipitation - mm of water per ha (daily).</p>	<p>Initial water table depth: Initial depth of water table. Positive values mean the water table is above the ground; negative values mean below the ground.</p> <p>Bottom depth of ground water: Depth of the bottom of groundwater.</p> <p>Peat floating parameter: Deviation of the peat ground induced by floating effect.</p> <p>Fraction of bypass flow: Fraction of surface water delivered into soil profile through a macro-porous medium.</p> <p>Intensity factor for surface outflow: Index for surface water outflow from the wetland.</p> <p>Intensity factor for ground inflow: Index for ground water entering the wetland.</p> <p>Intensity factor for ground outflow: Index for ground water outflow from the wetland.</p> <p>Lowest water table depth ceasing surface outflow (cm): The lowest depth of water table where surface water outflow ceases.</p>	<p>Soil fertility - This is a float number from 1.0 (for poor soil) to 3.0 (for fertile soil).</p> <p>Under-storytype: Dominant type of under-story bushes.</p> <p>Ground-growthtype: Dominant type of ground plants.</p> <p>Leaf: Initial leaf biomass, kg C/ha.</p> <p>Wood: Initial woody biomass.</p> <p>PlantN: Initial plant N storage, kg N/ha.</p> <p>WoodC Initial available C stored in woody biomass.</p> <p>PlantC: Initial available C stored in forest.</p> <p>Wood maintain resp. frac - Wood maintenance respiration as a fraction of gross photosynthesis.</p> <p>Respiration Q10: Effect of temperature on respiration.</p> <p>Water use efficiency: Water demand for producing a unit of biomass.</p> <p>Max N storage: Maximum N content in forest.</p> <p>Max leaf growth rate: Maximum foliage growth rate, %/year.</p> <p>Max wood growth rate: Maximum wood growth rate, %/year.</p>	<p>Forest floor type is defined based on quality of the organic matter in the forest floor.</p> <p>Mineral soil type is defined based on proportions of sand, silt and clay in a soil.</p> <p>Thickness of forest floor is the total thickness of the organic layer.</p> <p>pH is soil acidity.</p> <p>SOC - is soil organic carbon concentration at the top soil (0-5 cm).</p> <p>Bulk Density - is soil bulk density.</p> <p>Clay % - is clay fraction by weight.</p> <p>Hydrologic conductivity is soil saturated hydrological conductivity.</p> <p>Porosity - is pore volumetric fraction of the soil.</p> <p>Field Capacity is the maximum water-filled fraction of total porosity in a freely drained soil.</p> <p>Wilting Point is the maximum water-filled fraction of total porosity at which the plant starts wilting permanently.</p>

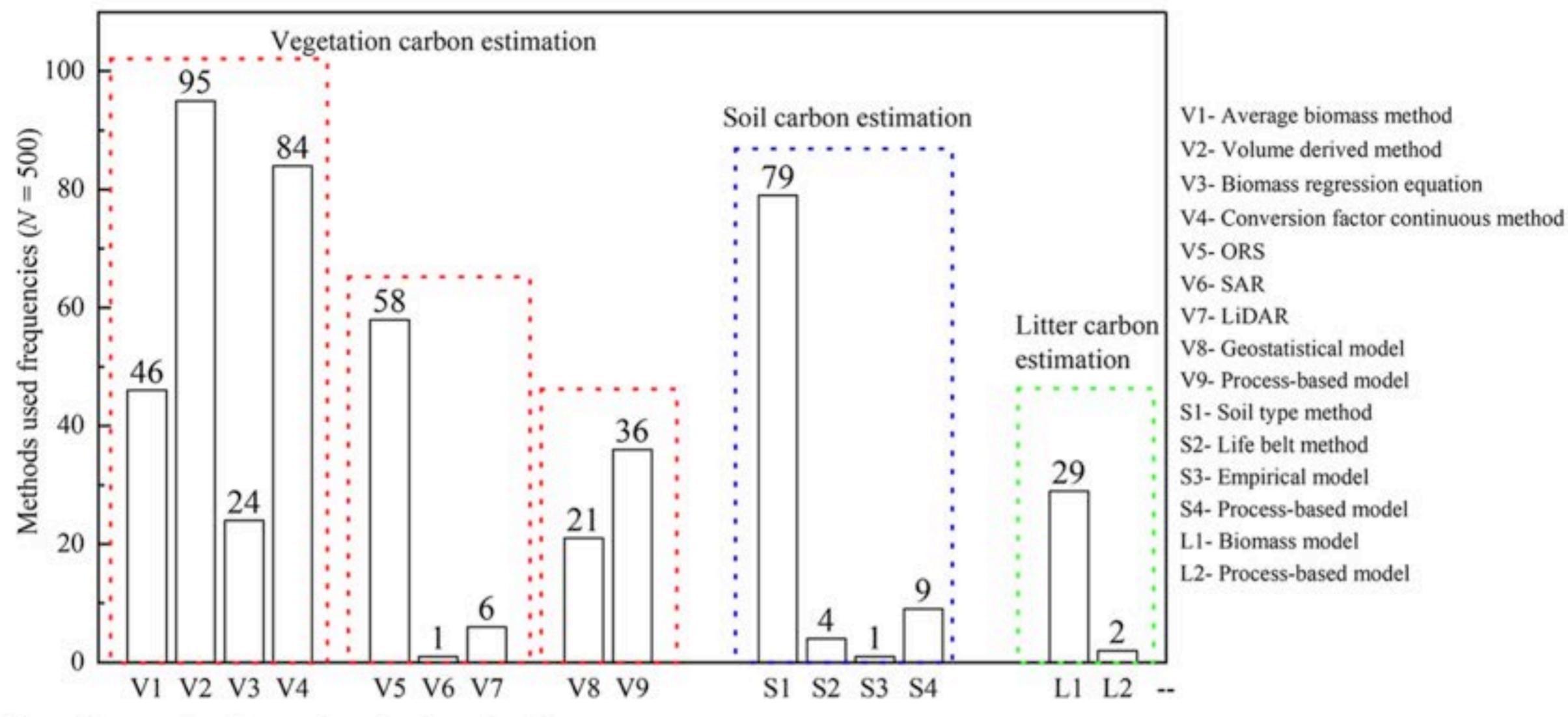
DNDC-Forest simulation model

Output data

1. The Balance - mass balances for C and N in the forest or in the soil.
2. Daily climatic conditions, water table dynamics, and C and N pools and fluxes in different segments of the forest ecosystem.
3. Annual summary for the most important pools and fluxes occurring in the ecosystem.

Сравнение различных подходов и моделей

Многообразии подходов и моделей находит отражение в исследованиях



Сравнение различных подходов к моделированию

Различные модели = Различный результат расчетов

Table 3 Research on forest vegetation carbon storage in China during 1989–1993

Estimation Methods	Forest area (10 ⁴ km ²)	Carbon density (Mg·ha ⁻¹)	Carbon storage (Pg C)	Reference
Volume-derived method	108.64	38.70	4.20	(Liu et al. 2000)
Volume-derived method	108.63	34.29	3.73	(Wang et al. 2001)
Volume-derived method	91.43	41.32	3.78	(Zhao and Zhou 2004)
Volume-derived method	108.64	37.87	4.11	(Xu et al. 2007)
Volume-derived method	108.64	38.85	4.22	(Wu et al. 2008)
Volume-derived method	199.78	30.04	6.00	(Zhang et al. 2013a)
Average biomass method	108.62	57.07	6.20	(Zhou et al. 2000)
Biomass regression equation	108.6	37.00	4.02	(Pan et al. 2004)
Conversion factor continuous method	108.63	42.58	4.63	(Fang et al. 2001b)
Conversion factor continuous method	131.8	37.40	4.93	(Fang et al. 2007)
BIOME3	127.06	71.70	9.11	(Nan 2001)
CEVSA	121.63	71.69	8.72	(Li et al. 2003)
CASA Model	127.89	45.30	5.79	(Piao et al. 2005a, b)

Гибридные подходы к моделированию

