

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

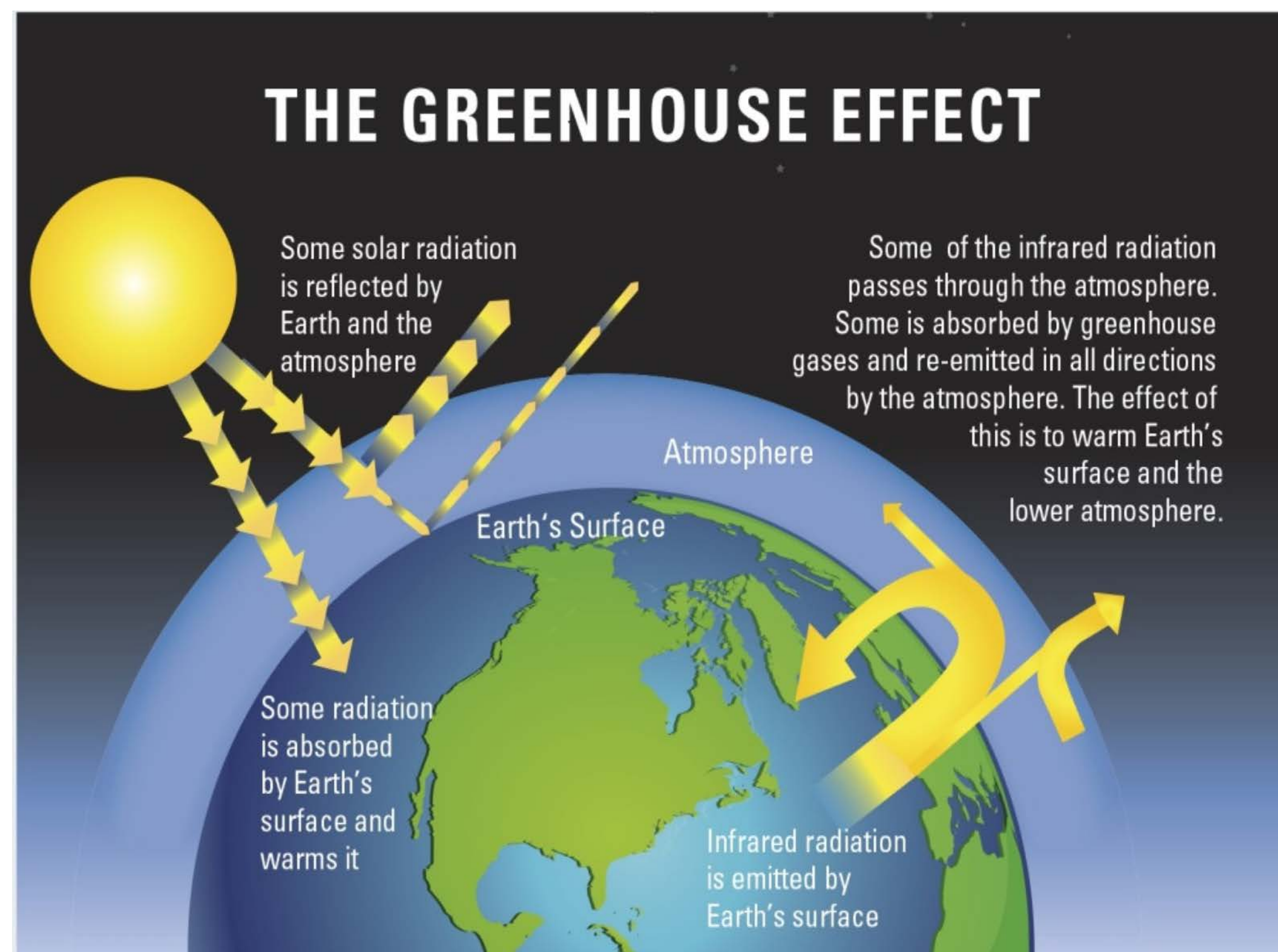
1. Реализация климатической повестки в РФ
2. Карбоновые полигоны: где, что, зачем?
3. Подходы к оценке углеродного баланса:
 - Дистанционные методы зондирования земли (ДЗЗ)
 - Процессные модели
 - Гибридные модели

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



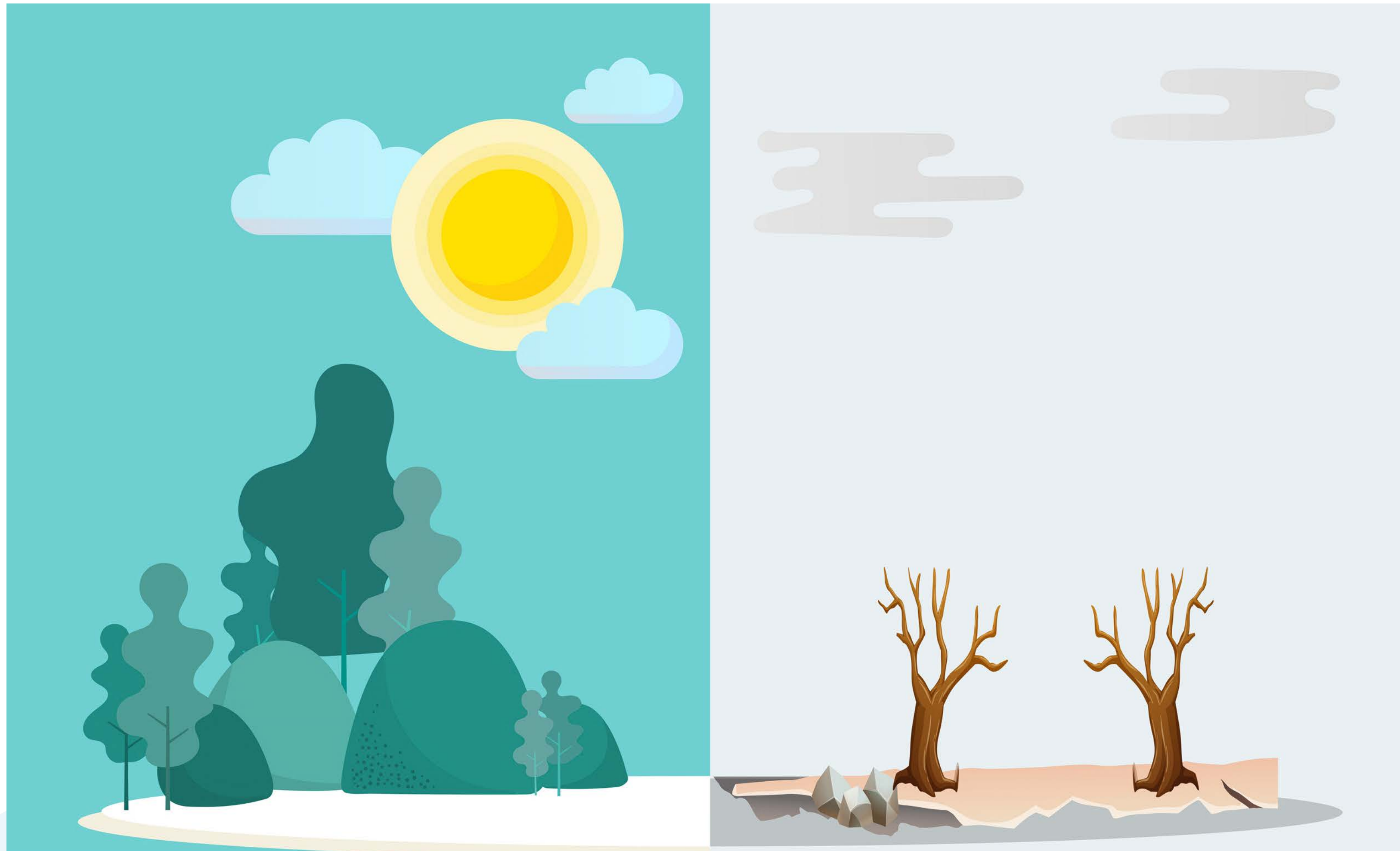
Глобальное изменение климата



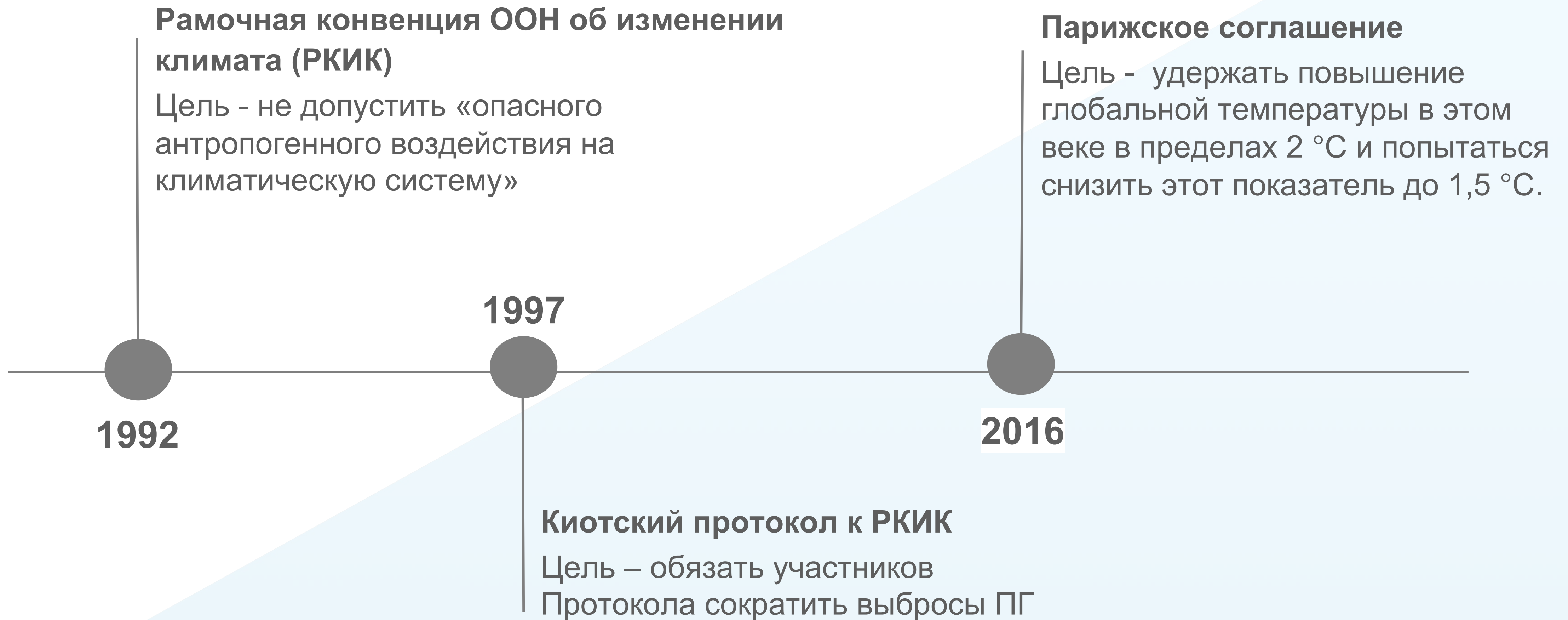
- ❑ В период 1880–2012 годов средняя глобальная температура повысилась на 0,85 °С
- ❑ Средняя глобальная температура прямо зависит от концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере Земли
- ❑ С начала индустриальной эпохи концентрация ПГ постоянно увеличивается
- ❑ Основные ПГ – H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3

* 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 верифицирующей 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*



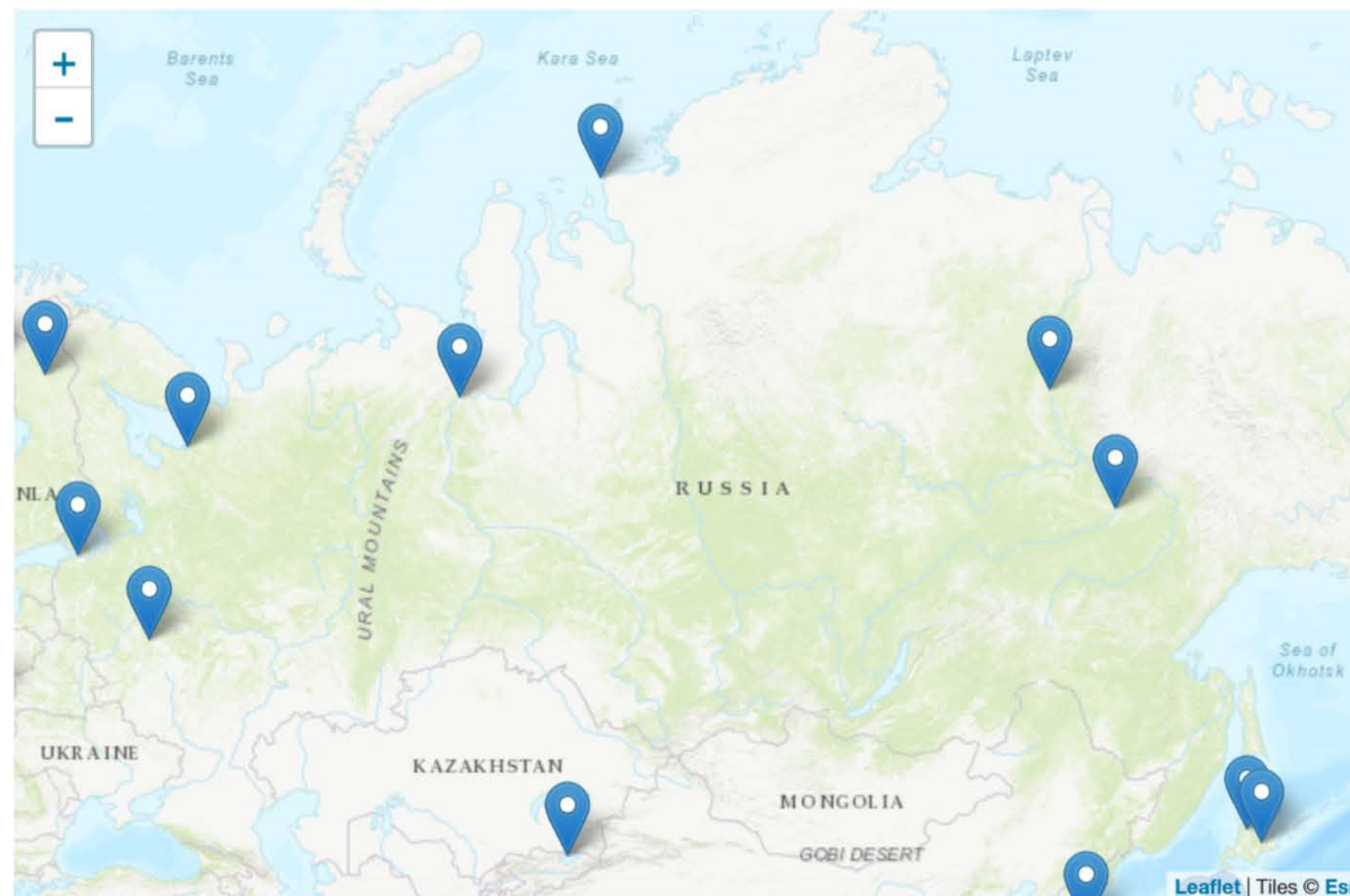
* Заседание от 15 июля 2021 года

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

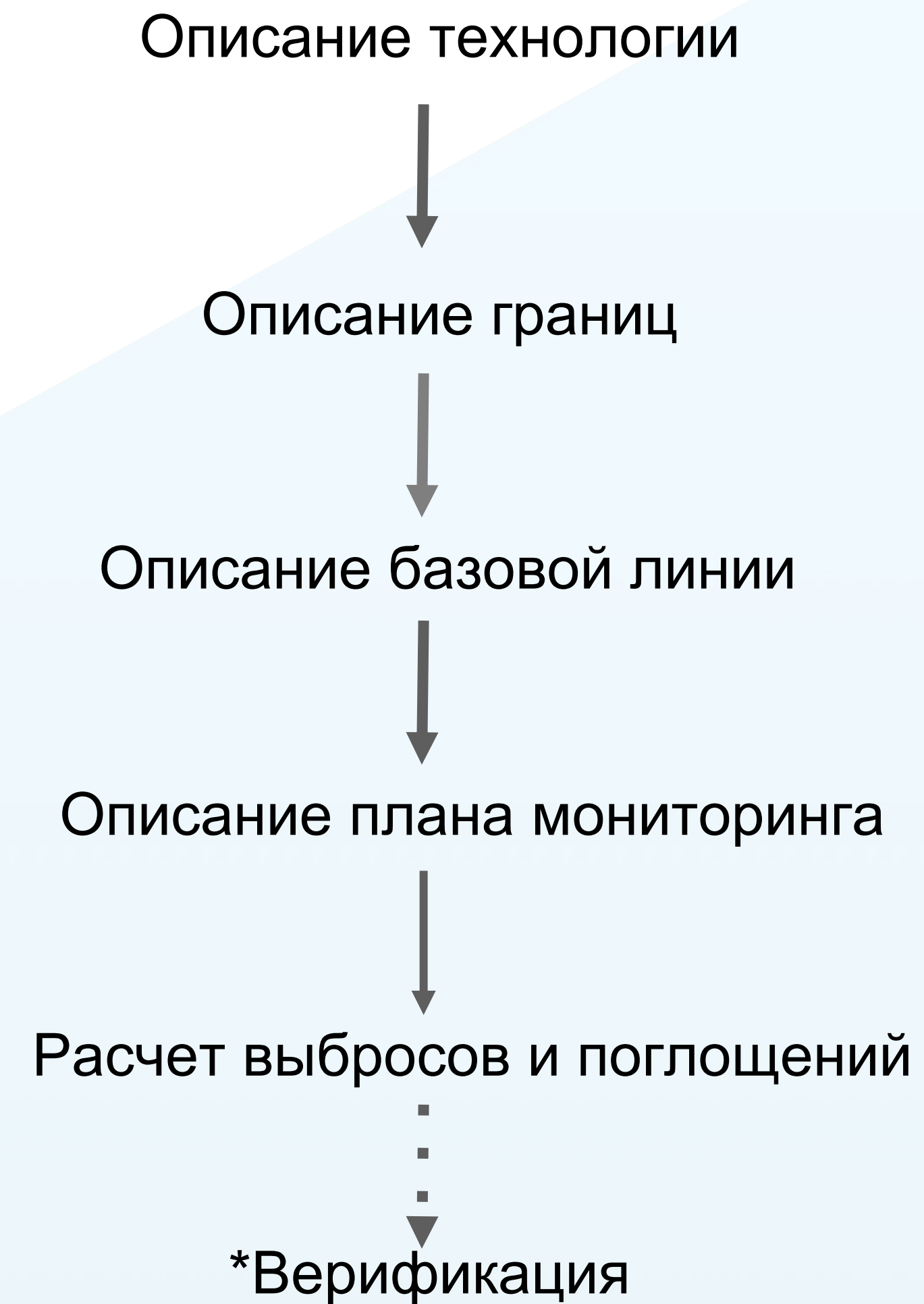
- Brewer
- Dobson
- FTIR Spectrometer
- Lidar
- Microwave Radiometer
- Sonde
- UV Spectroradiometer
- UV/Visible Spectrometer

Clear all

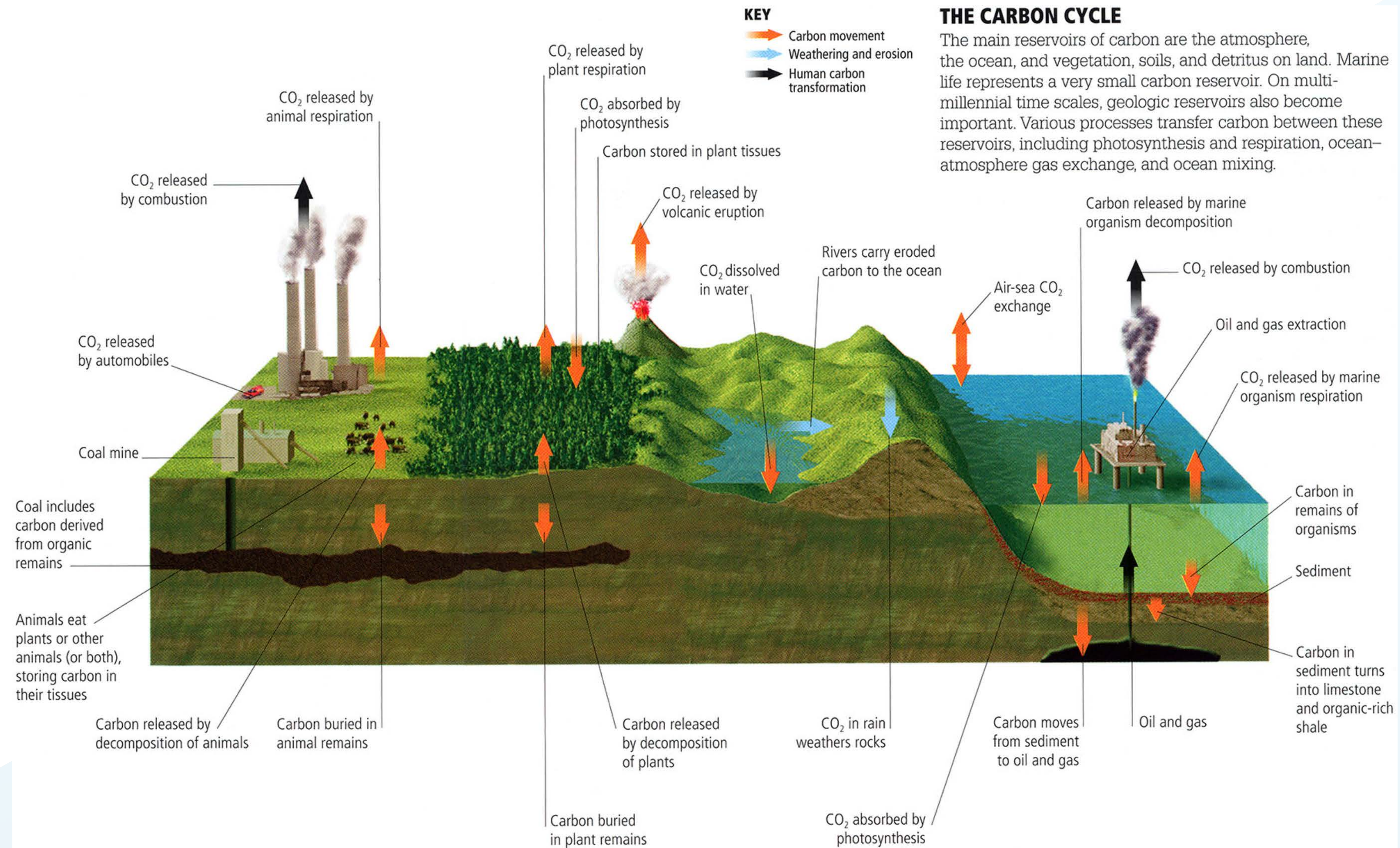


Станции мониторинга, данные с которых обобщаются в отчетах Росгидромета: Териберка, Новый порт, Тикси, Санкт-Петербург, Обнинск + вышки проекта Fluxnet

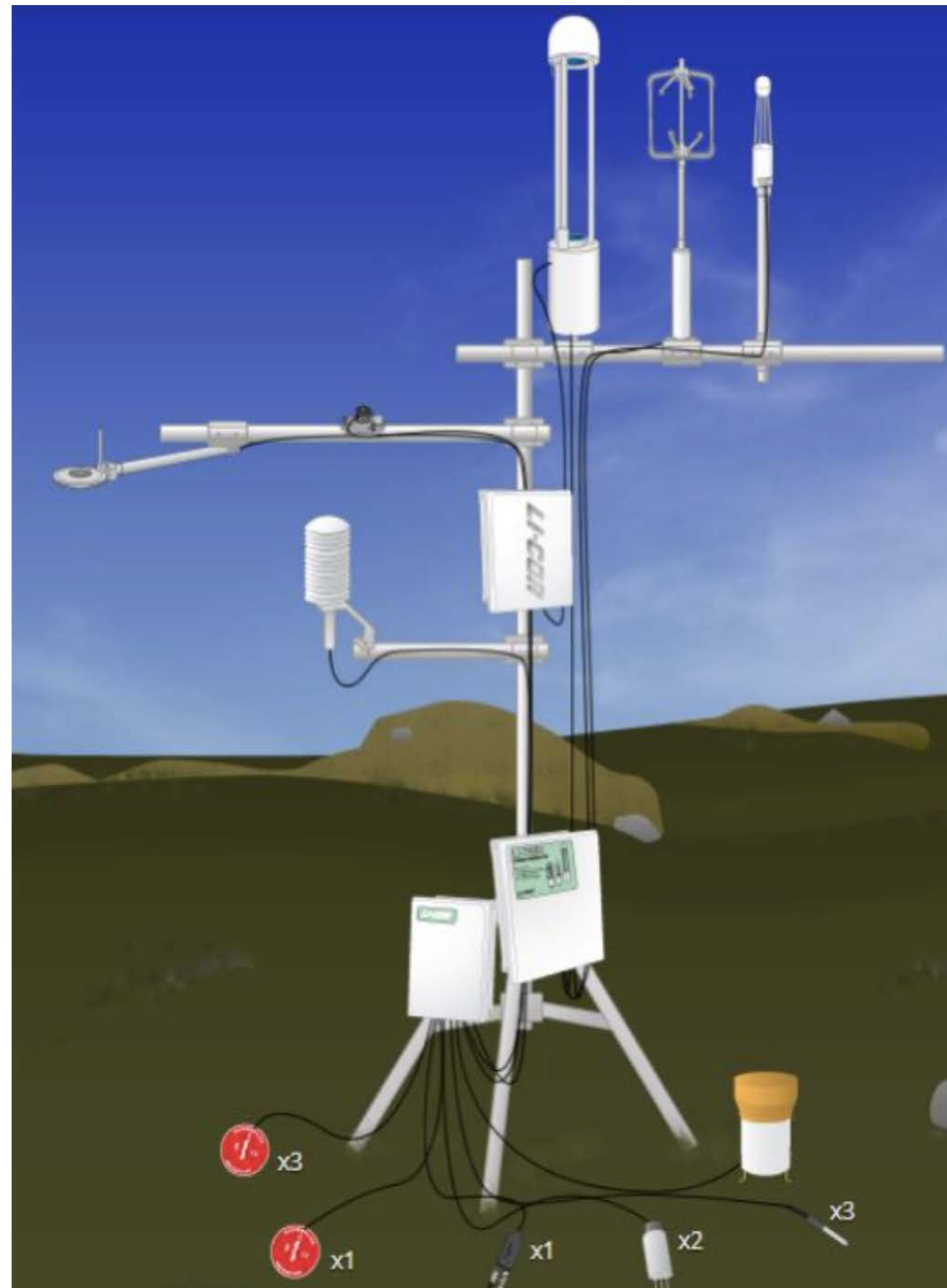
Общая стратегия и этапы запуска климатических проектов



Глобальный цикл углерода: основные пулы и потоки



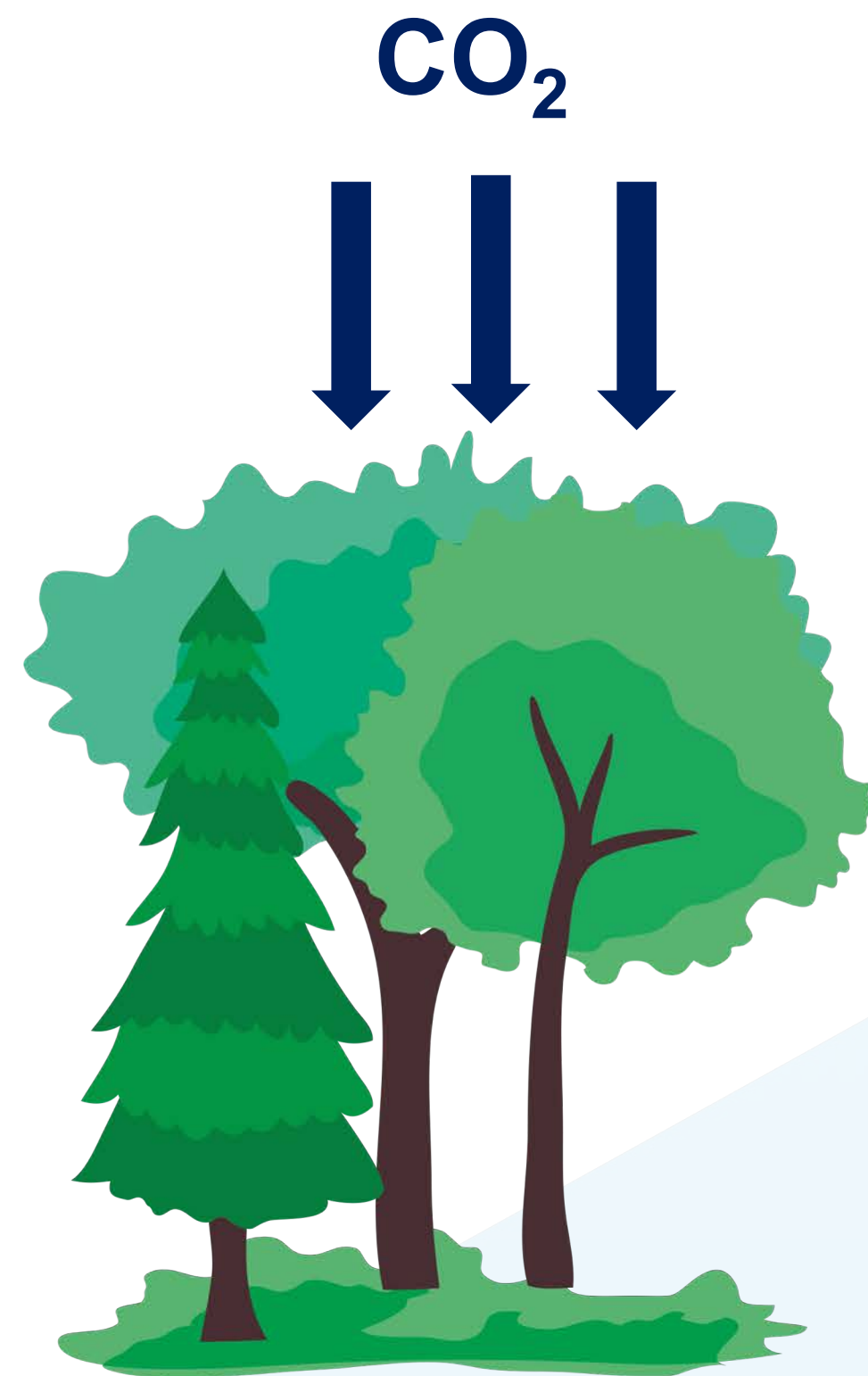
Элементы системы мониторинга (на примере проекта Fluxnet)



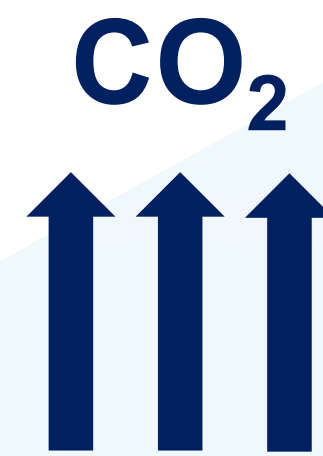
- ❑ Пульсационные измерения потоков ПГ
- ❑ Радиационный баланс – пиранометры и балансомеры на основе термоэлементов
- ❑ Коротковолновая радиация и ФАР: LI-200, LI-190SA, LI-191R
- ❑ Поток тепла в почву – диски и термометры
- ❑ Фотосинтез: LI-6400/XT
- ❑ Поток CO₂ из почвы: LI-8100/A, LI-8150
- ❑ Листовой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

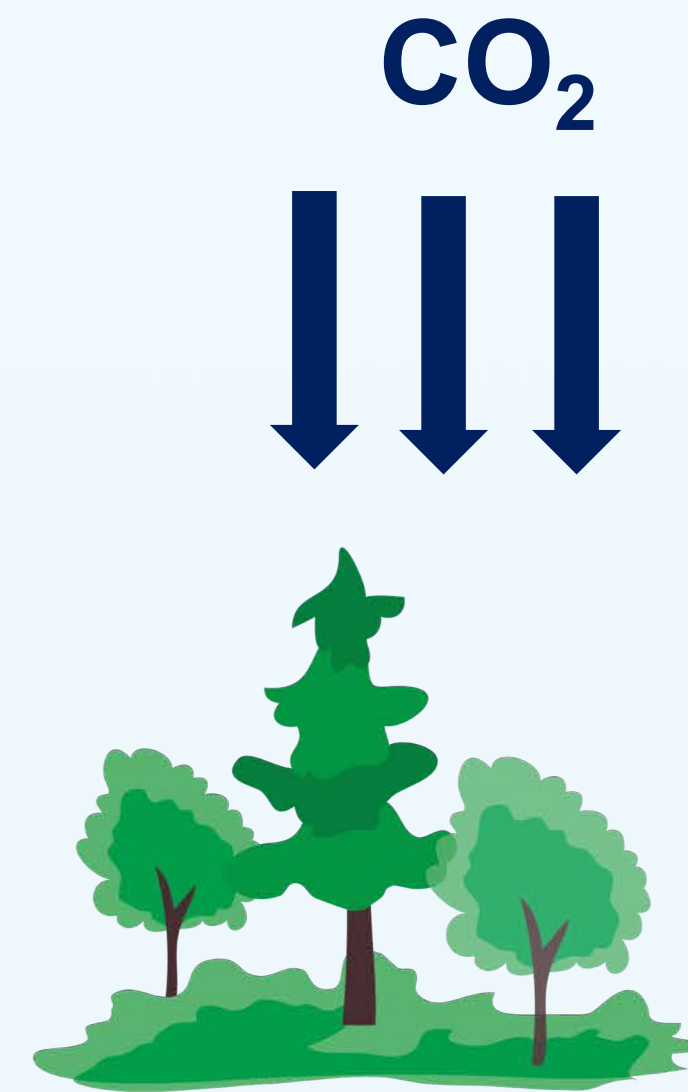
Лесные системы и бюджет углерода



Лес

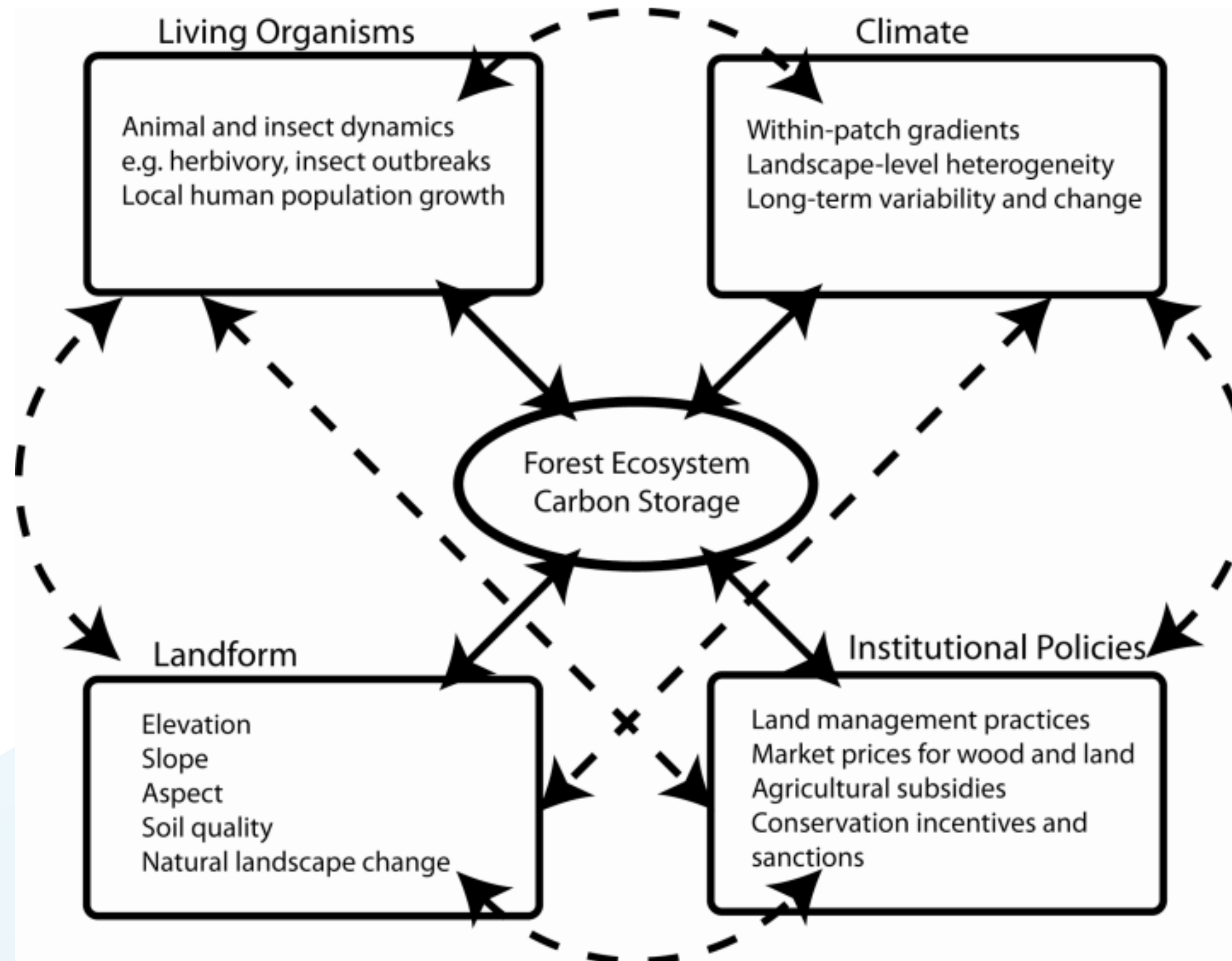


Вырубка/
Остатки деревьев

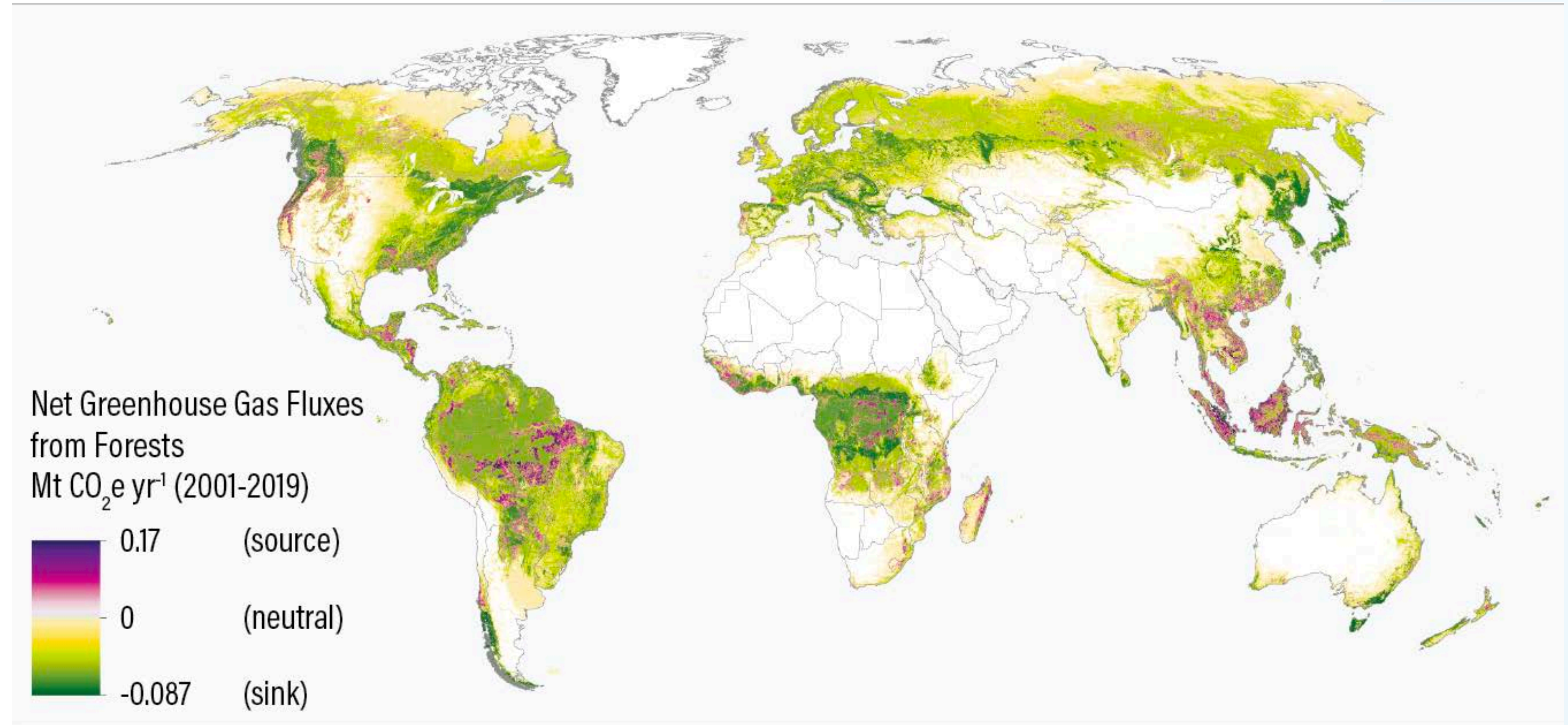


Поросль/
лесопосадка

Лесные системы и бюджет углерода

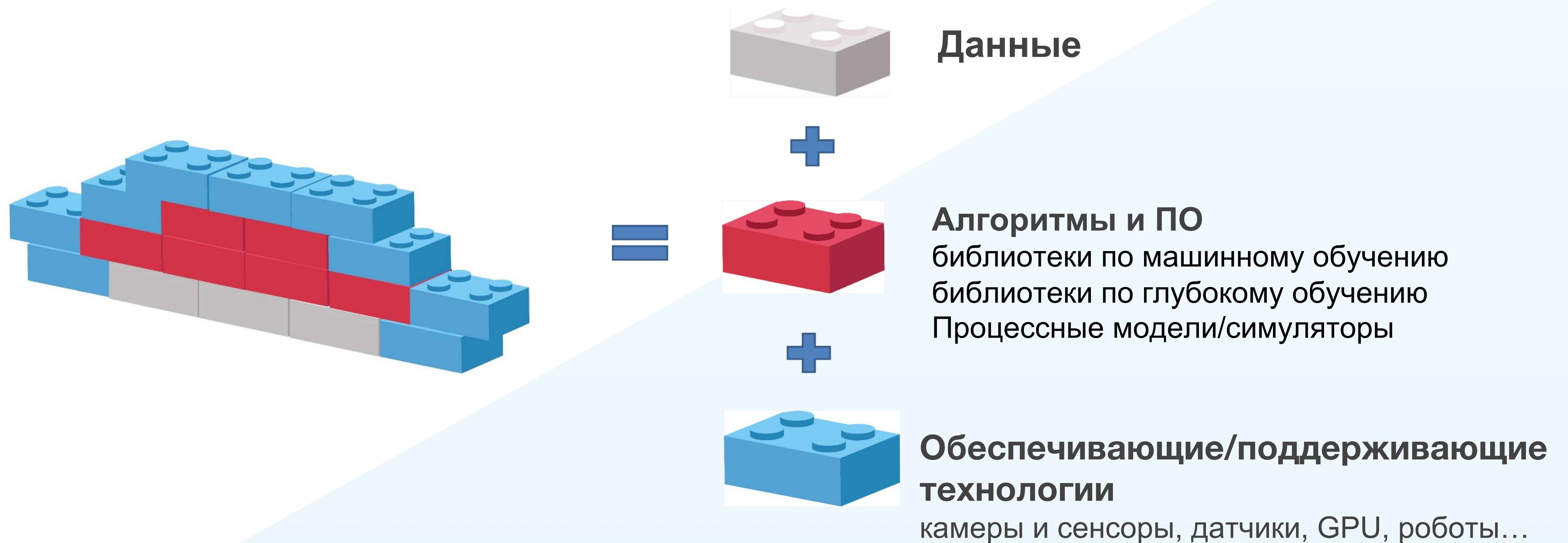


Лесные системы и бюджет углерода



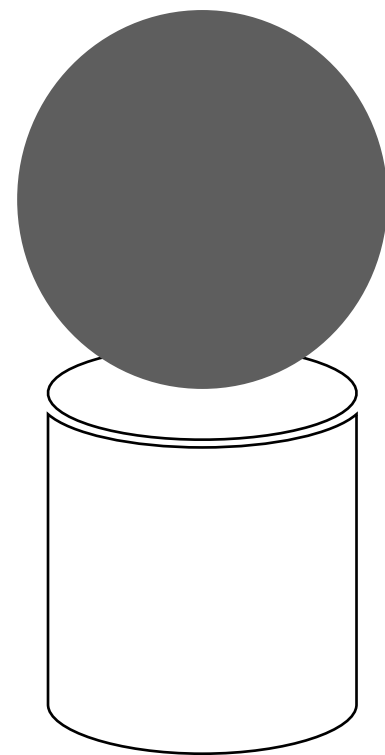
Источник: Harris, N.L., Gibbs, D.A., Vaccini, A. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 234–240 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>

Карбоновые полигоны как фабрика данных

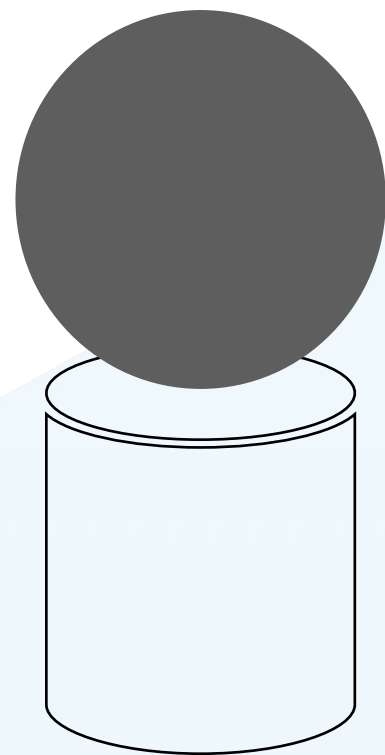


Традиционная операционная система работы с данными

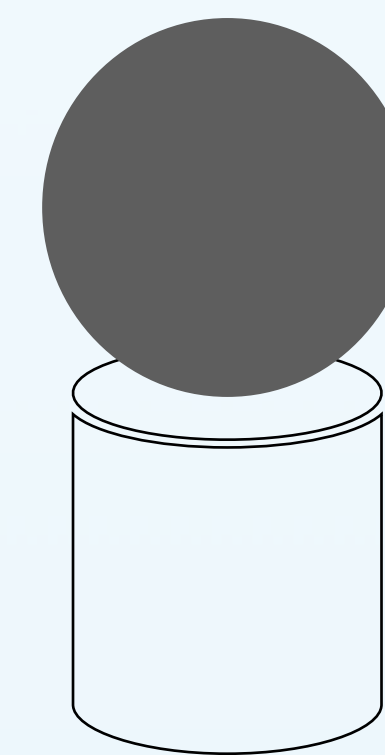
Традиционно, группы ученых собирают данные *непоследовательно, разделяя и изолируя* их в хранилища по подразделениям и благодаря используемым узкоспециальным приложениям и ИТ-системам.



Хранилище 1

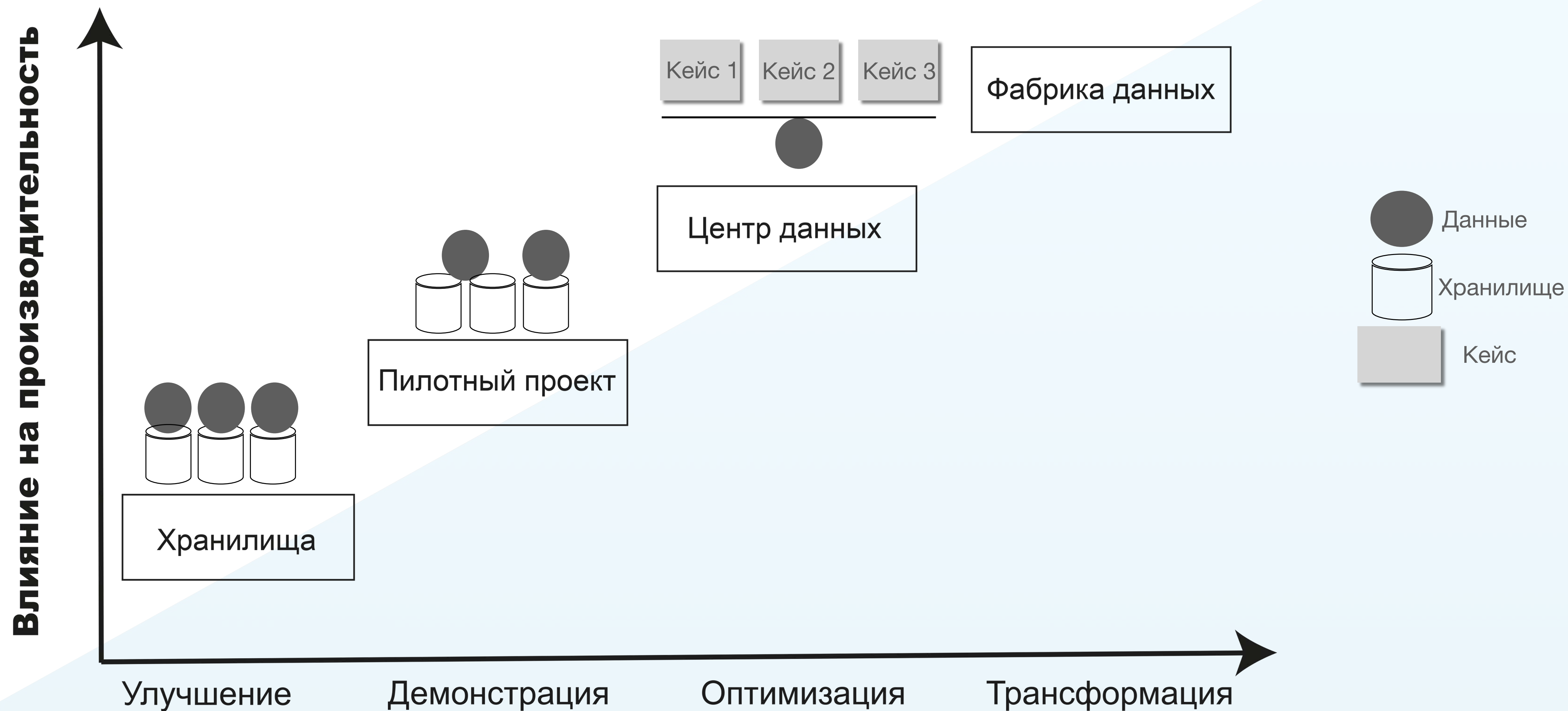


Хранилище 2

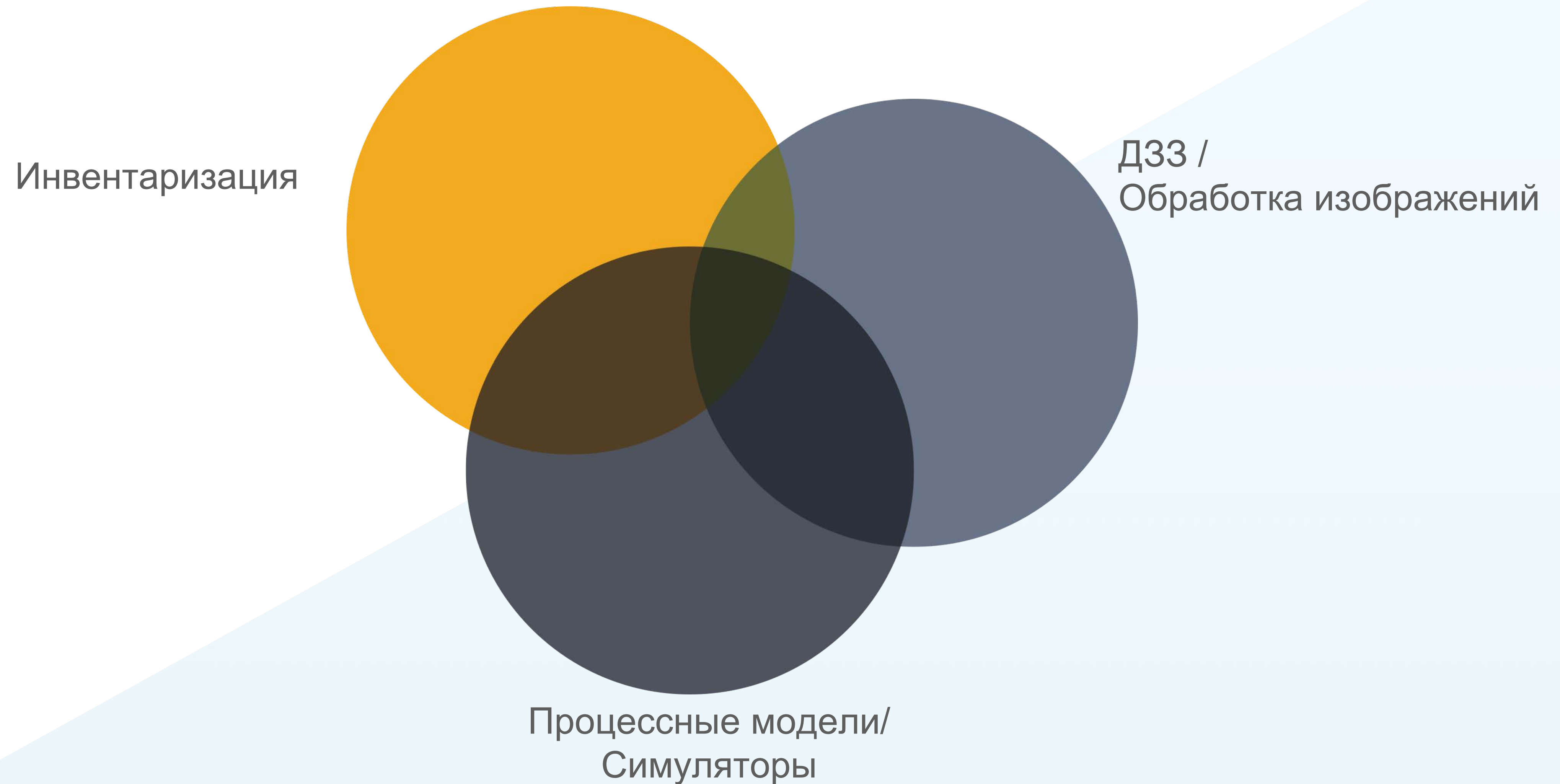


Хранилище N

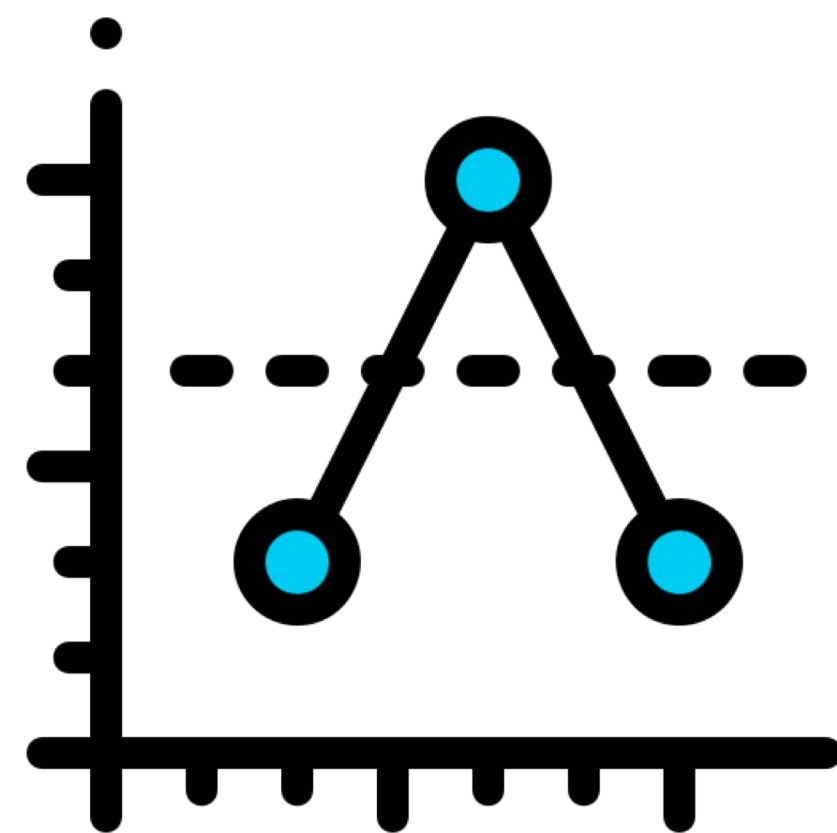
Этапы преобразований модели работы с данными



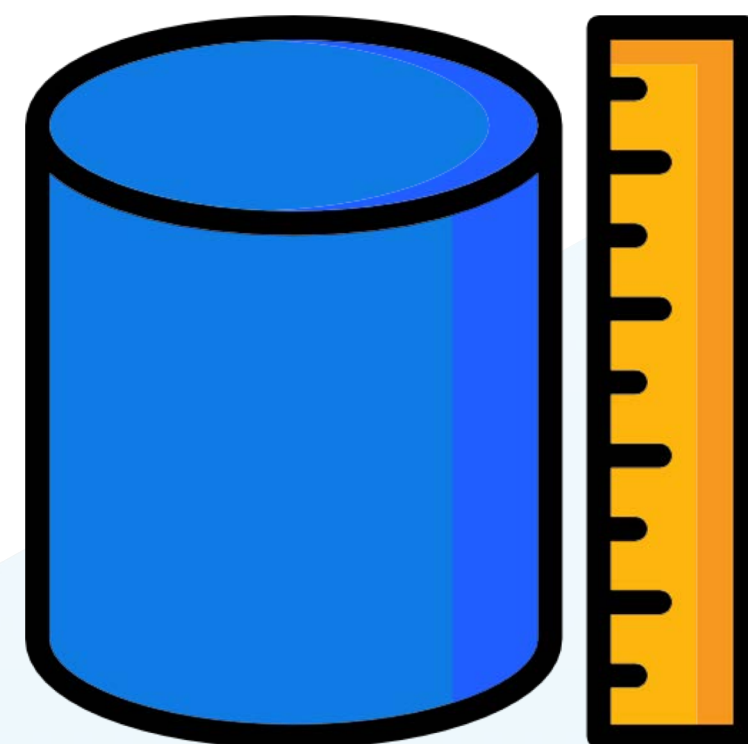
Методики оценки бюджета углерода



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, m;

h_i – высота i дерева, m.

Carbon absorption by soils: use case

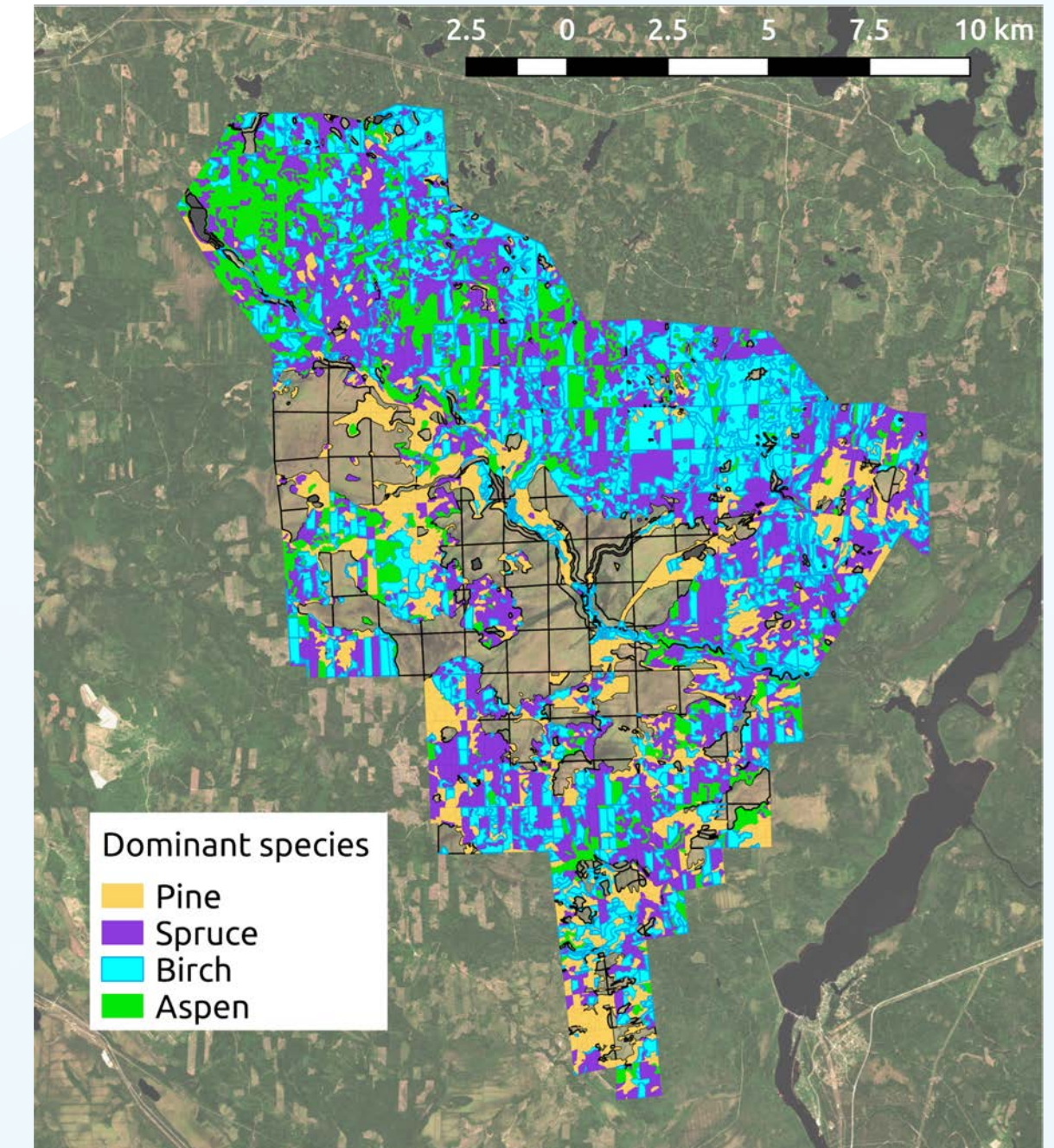
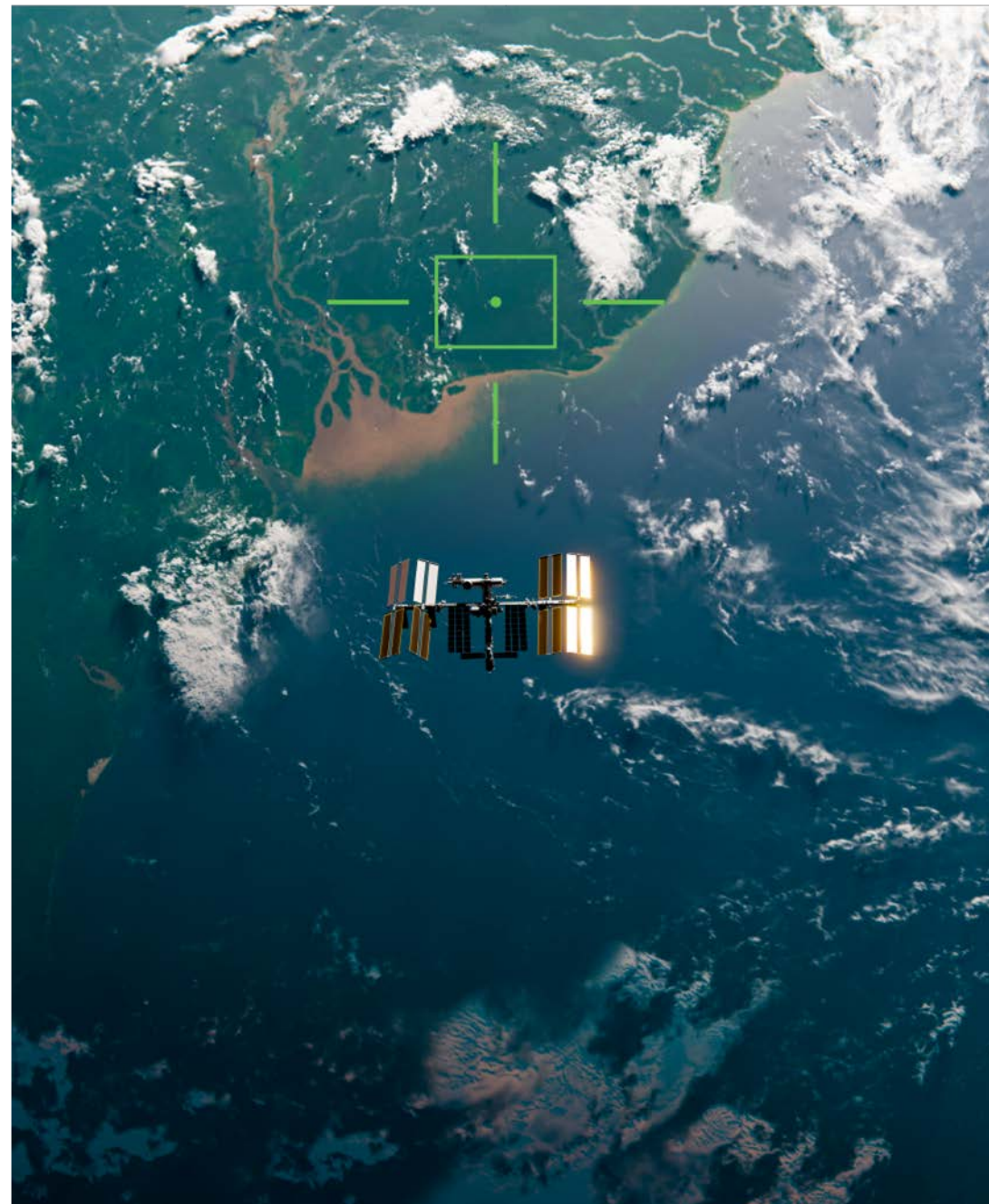
Для расчета используется информация о типе почвы и времени, прошедшем с момента прекращения обработки пахотной почвы.

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 0-20cm, 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

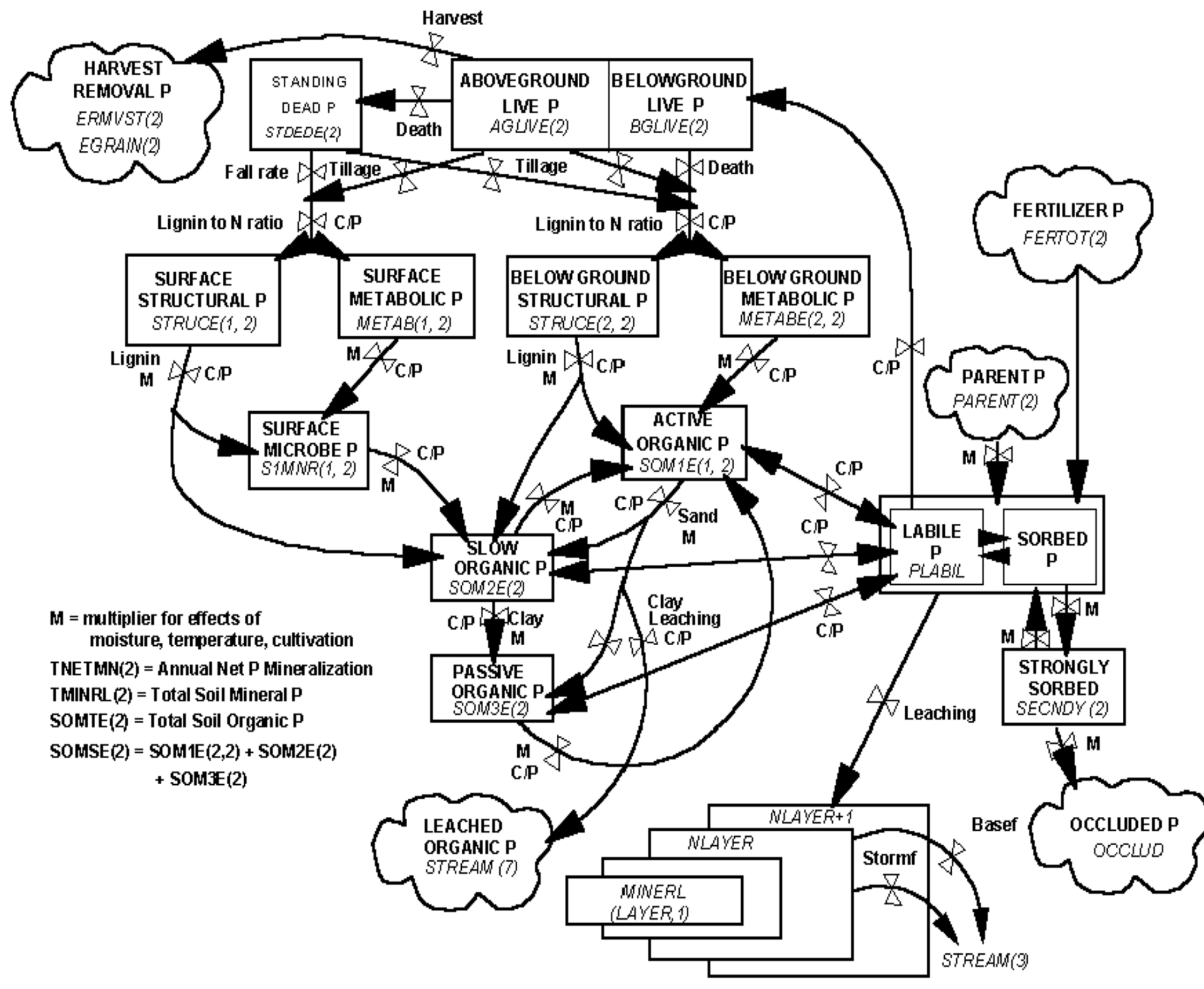
Forest-DNDC, SOMM, RothC – для симуляции динамики CN в **лесных экосистемах**

Ограничения существующих моделей:

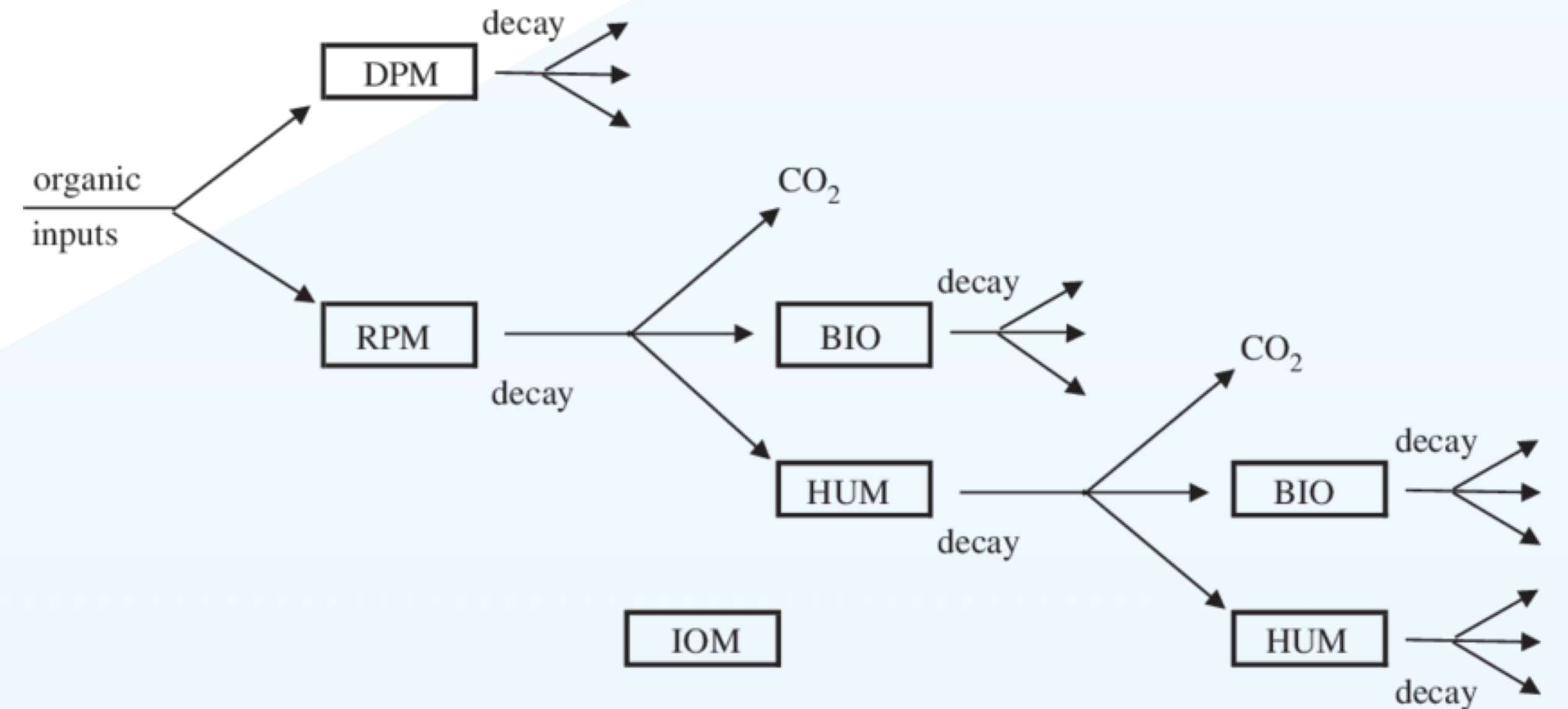
- ❑ степень их открытости
- ❑ язык программирования
- ❑ возможности для масштабирования и повышения вычислительной эффективности

Процессные модели

CENTURY biogeochemical model



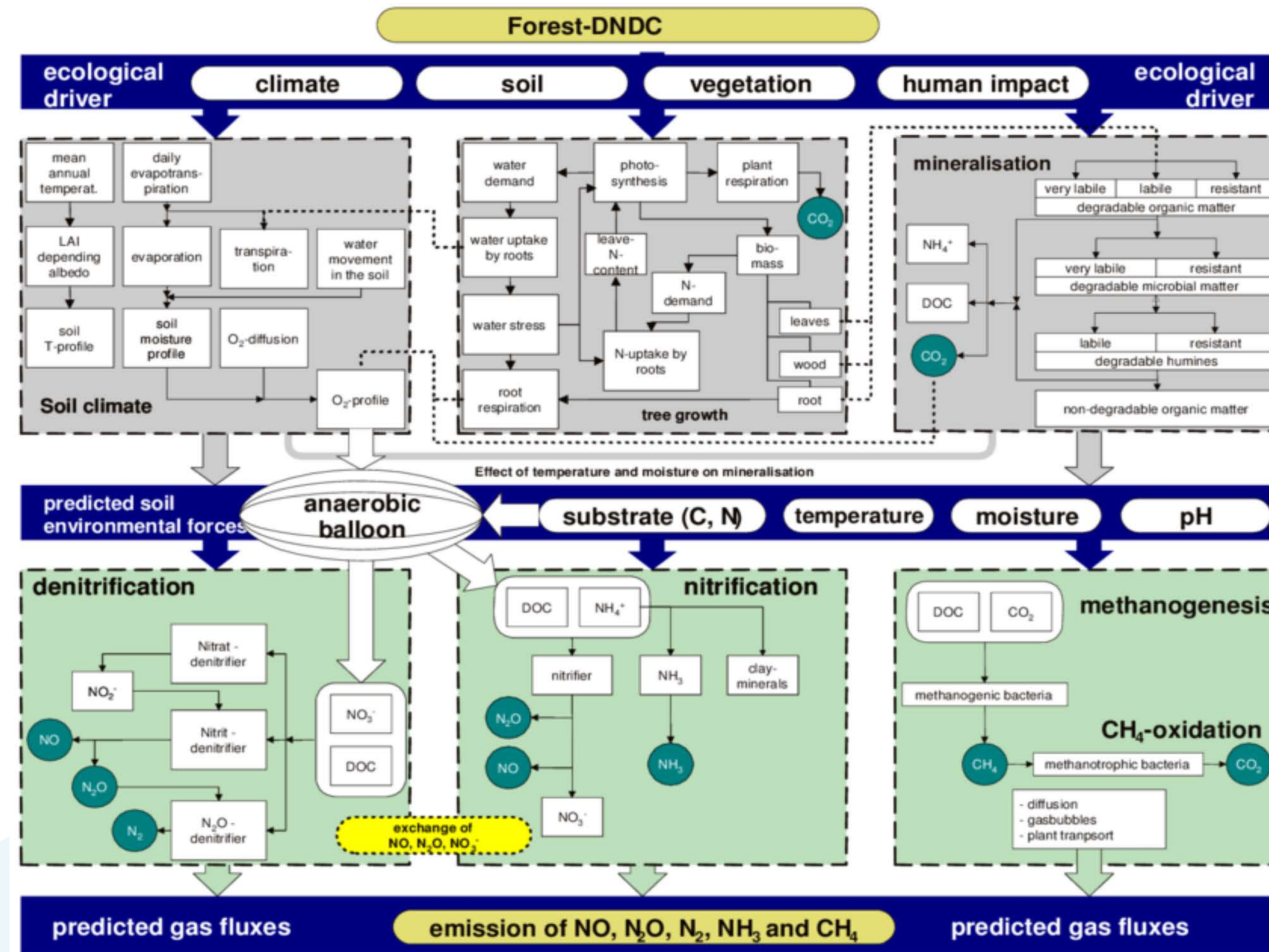
Rothmsted carbon (Roth C) model



| | 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> |

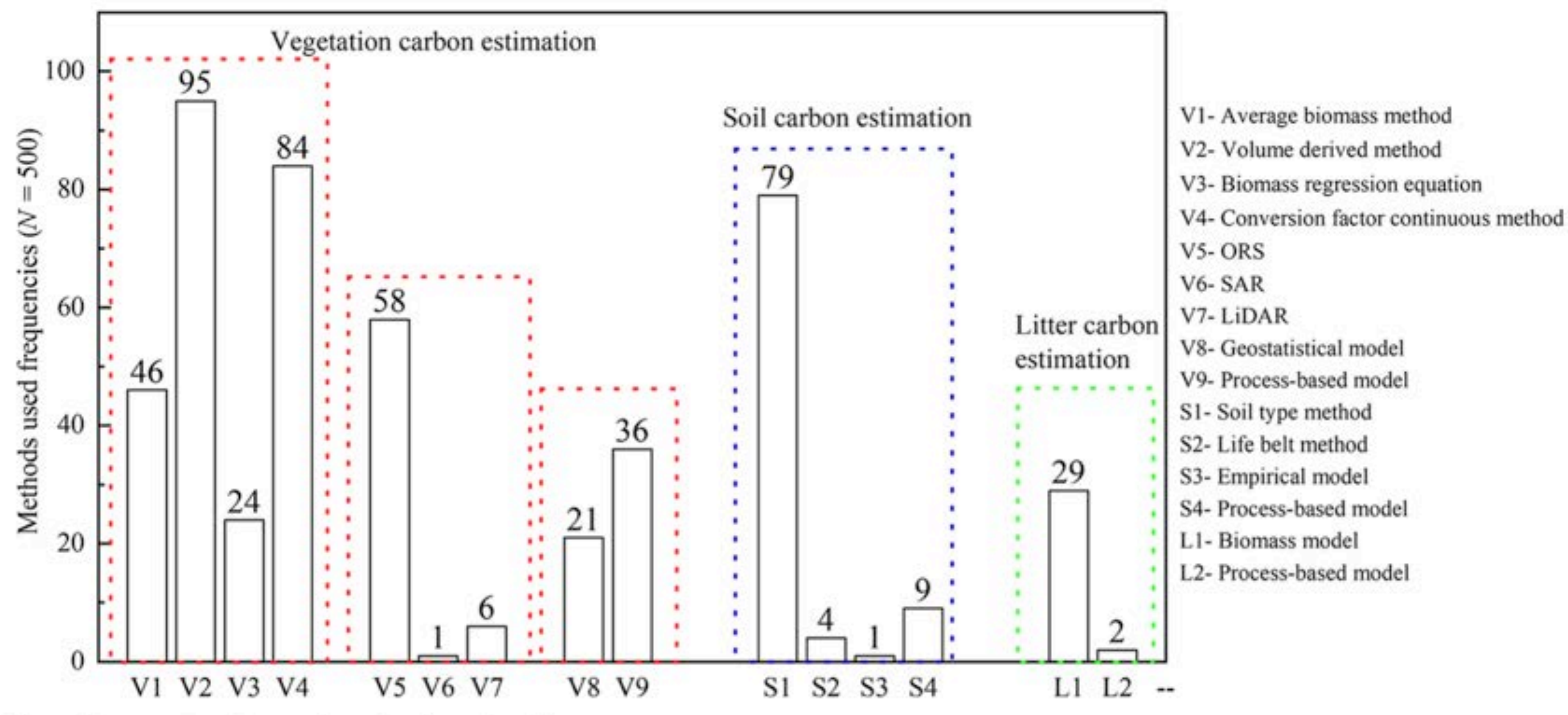
DNDC-Forest simulation model

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

