

# Прогнозная оценка динамики пулов углерода и потоков парниковых газов в основных типах наземных экосистем России: методические подходы и результаты

Шанин В.Н.,  
Тебенькова Д.Н.,  
Чумаченко С.И.,  
Щепащенко Д.Г.,  
Голубятников Л.Л.,  
Романенков В.А.,  
Суховаева О.Э.,  
Богомоллов В.Ю.,  
и др.

# Рабочая группа: Моделирование

**Цель:** прогнозная оценка динамики пулов и потоков углерода наземных экосистем методами математического моделирования

## **Задачи:**

- Формирование комплекса моделей для прогнозной оценки изменений в пулах углерода и потоков парниковых газов в основных типах наземных экосистем России
- Параметризации и валидация моделей на основе базы входных параметров
- Проведение имитационных экспериментов для прогноза динамики пулов и потоков углерода в наземных экосистемах с использованием набора сценариев природопользования и климатических сценариев
- Интеграция системы прогнозной оценки с системой мониторинга пулов и потоков углерода (применение результатов мониторинга для параметризации и валидации моделей) для наземных экосистем

# Связь с общими целями и задачами Консорциума

- Оценка репрезентативности создаваемой сети мониторинга
- Разработка методов интеграции данных сети мониторинга со средствами прогнозной оценки
- Включение прогнозных оценок в общую информационно-аналитическую систему
- Получение новых оценок бюджета углерода на национальном уровне

# В контексте Рамочной конвенции ООН об изменении климата

- Выработка рекомендаций по повышению эффективности управления наземными экосистемами с точки зрения снижения эмиссии / повышения связывания парниковых газов
- Уточнение оценок эмиссии парниковых газов в разных типах наземных экосистем для учёта в Национальном кадастре

# Связь с другими Консорциумами

- К1 (“Разработка глобальной модели Земной системы...”): входные данные, вычислительные модули и блоки, кросс-валидация
- К5 (“Создание методик разработки сценариев...”): прогнозные оценки эффективности сценариев декарбонизации
- К6 (“Техническое перевооружение ... Национального кадастра...”): валидация / уточнение конверсионных коэффициентов для расчёта эмиссии и поглощения парниковых газов

# Комплекс прогнозных моделей

- **Лесные экосистемы:** динамическая модель древостоя (*ЦЭПЛ РАН*), модель динамики органического вещества почвы (*ФИЦ ПНЦБИ РАН*), регрессионные модели оценки фитомассы древостоя и дыхания почвы, глобальная лесная модель (*ИЛ СО РАН*)
- **Агроэкосистемы:** модели бюджета углерода пахотных почв, углеродные калькуляторы (*ИГ РАН, факультет почвоведения МГУ*)
- **Тундровые и лесотундровые экосистемы:** нелинейная динамическая модель углеродного цикла (*ИФА РАН*)
- **Болотные экосистемы:** численная модель тепло- и влагопереноса, включая параметризацию для расчёта потоков парниковых газов (*К1: ИВМ РАН, МГУ*) и параметризацию уровня грунтовых вод (*ИМКЭС СО РАН*)

# Оценка репрезентативности комплекса моделей

Тип наземных экосистем	Доля от общей площади сухопутной территории России, %	Возможности сценарного моделирования
Лесные экосистемы	47	хозяйственная деятельность, изменения климата, биотические и абиотические нарушения
Агроэкосистемы	13	хозяйственная деятельность, изменения климата
Тундровые и лесотундровые экосистемы	12	изменения климата, биотические нарушения
Болотные экосистемы	8	хозяйственная деятельность, изменения климата
<b>ИТОГО:</b>	<b>80%</b>	

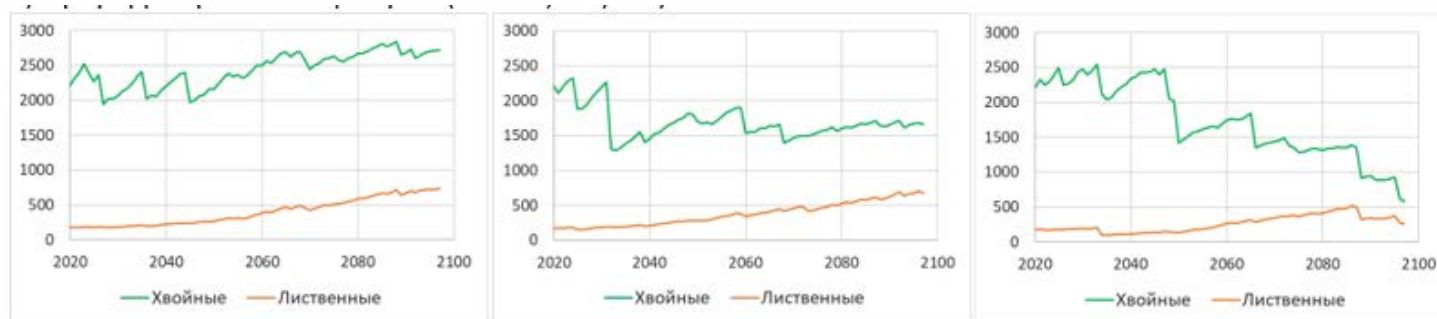
Пространственный уровень: локальный, региональный.  
Национальный – с рядом допущений.

# Глобальная лесная модель (G4M): прогноз запаса С в древесине (Красноярский край), млн. т

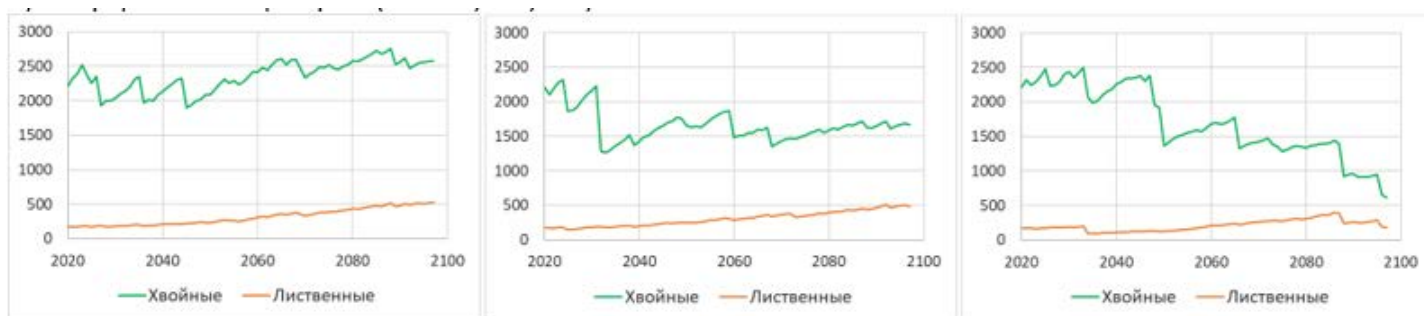
**Природоохранный сценарий**  
(рубка в возрасте максимальных запасов – максимизация запасов углерода в древостое)



**Инерционный сценарий**  
(сохранение текущей практики лесопользования)



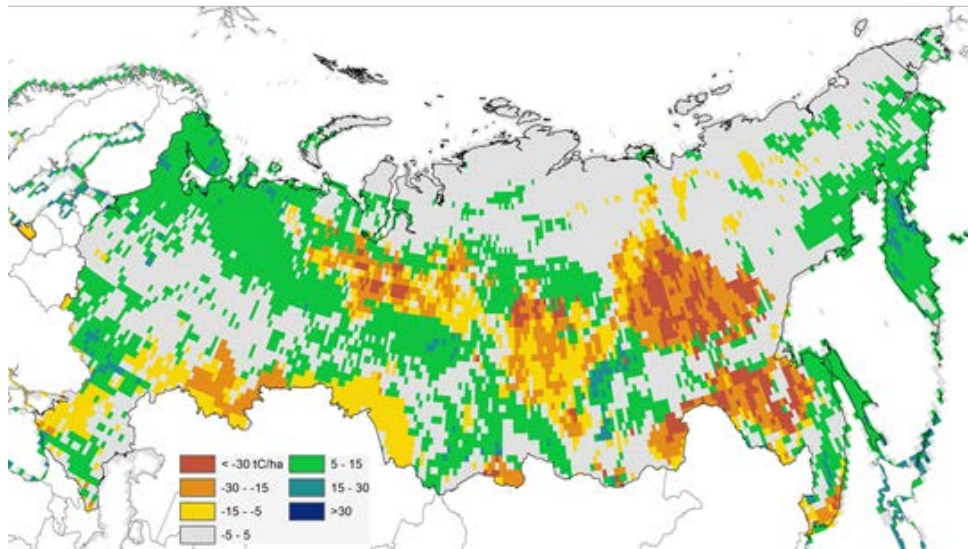
**Интенсивный сценарий**  
(рубка в возрасте максимального среднего прироста – максимизация скорости поглощения углерода)



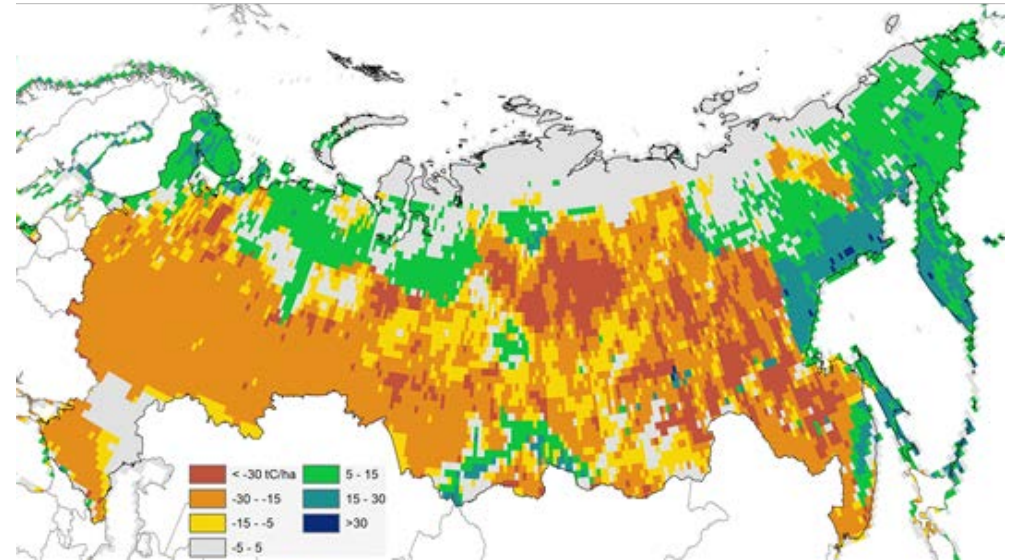


# Прогноз изменения запаса углерода в древостое на национальном уровне, инерционный сценарий

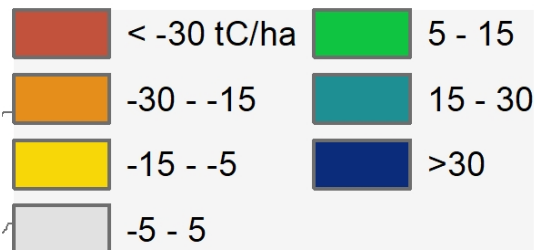
2020-2100, RCP2.6

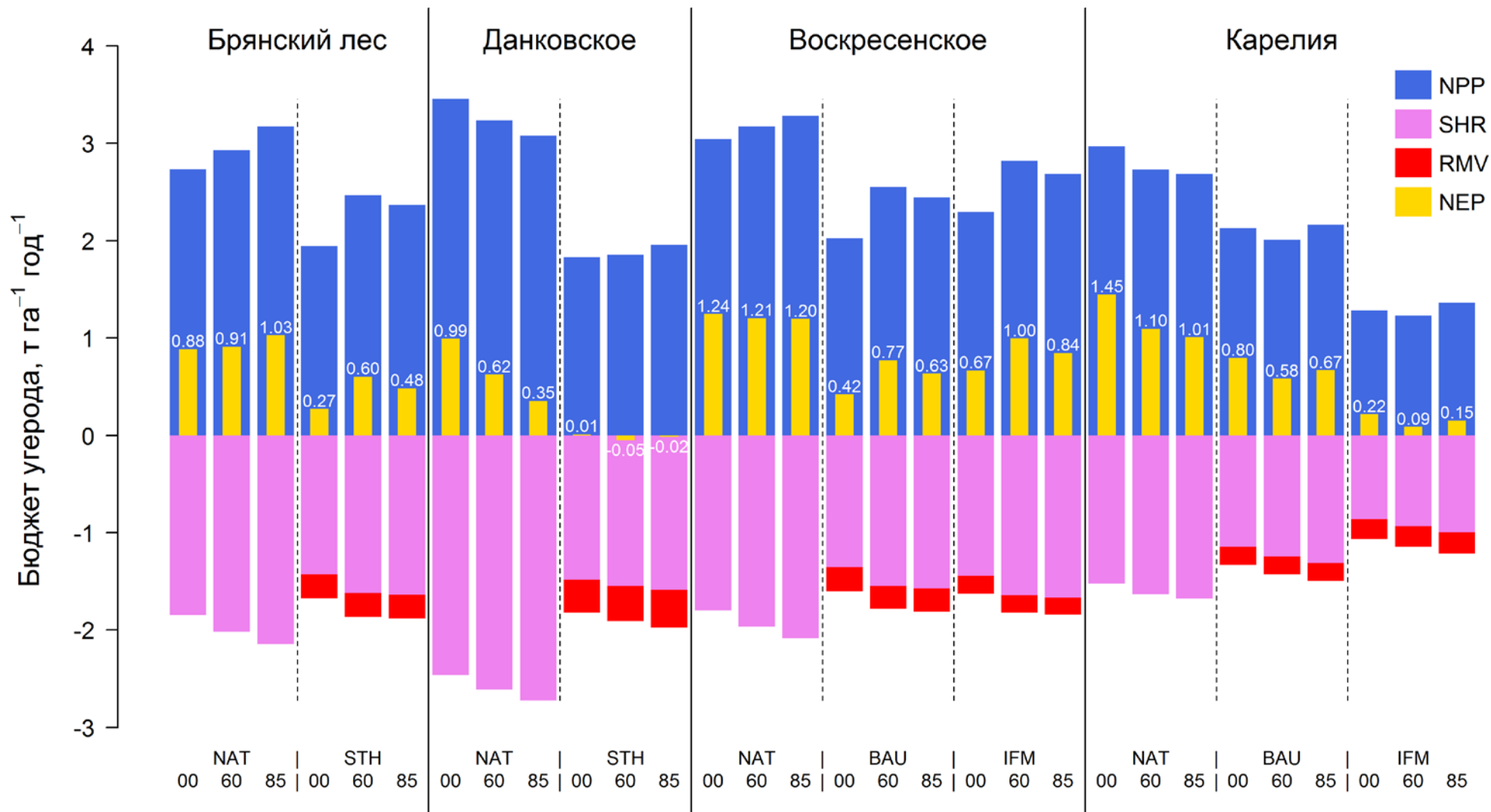


2020-2100, RCP8.5



Изменение запаса углерода в древостое, т/га





### Моделирование на уровне лесничеств

Компоненты бюджета углерода (усреднённые значения за 100 лет, т га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) при разных сценариях. NPP – чистая первичная продукция древостоя, SHR – гетеротрофное дыхание почвы, RMV – удаление фитомассы при рубках, NEP – нетто-экосистемная продукция как результирующая трёх указанных выше потоков с учётом их знака. Все показатели приведены в пересчёте на углерод. NAT – сценарий без рубок; STH – добровольно-выборочные рубки в 2 приёма и естественное зарастание; BAU – текущая практика (сплошные рубки в эксплуатационных лесах, добровольно-выборочная рубка в 2 приёма в защитных; освоение расчётной лесосеки(65–87%) – на основе фактических данных); IFM – аналогично, но освоение расчётной лесосеки: 90–100%.

# Секвестрация углерода в пахотных почвах РФ

Методика работы соответствовала унифицированной методологии ФАО по составлению Глобальной карты секвестирования почвенного углерода (GSOCseq)



**ДААННЫЕ ТЕКУЩЕГО  
ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ**

- Оценка по снимкам MODIS с разрешением 300 м
- временной ряд вегетационных индексов NDVI и EVI, полученных со спутника MODIS (MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices): оценка NPP



**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

- Климатическая база данных CRU с разрешением 50\*50 км (Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901-2020): среднемесячная температура, осадки и эвапотранспирация

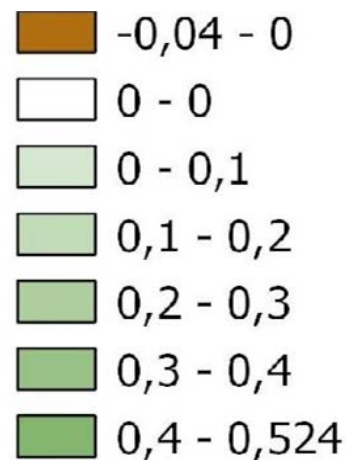
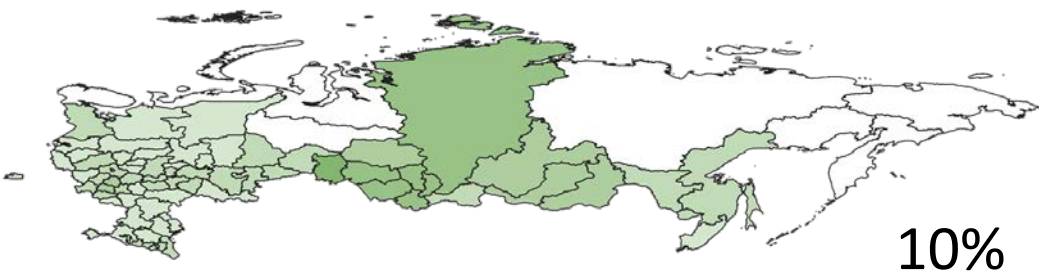
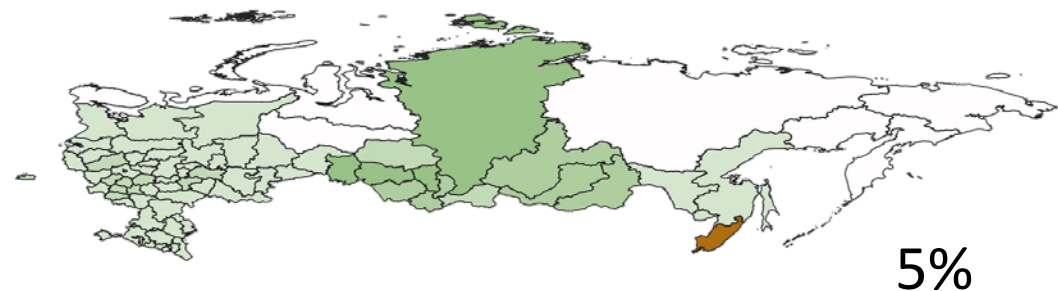


**ПОЧВЕННЫЕ ДАННЫЕ**

- Источник данных по запасу Сорг – национальная карта запасов почвенного органического углерода на глубине 0–30 см (GSOC17)
- Содержание ила – карта SoilGrids 250m версия 2.0

Применялась RothC (Ротамстедская модель)

Средняя скорость секвестрации почвенного углерода (т С га/год) по субъектам РФ при сохранении неизменного землепользования (НЗ) и при трех сценариях, где предполагается увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%

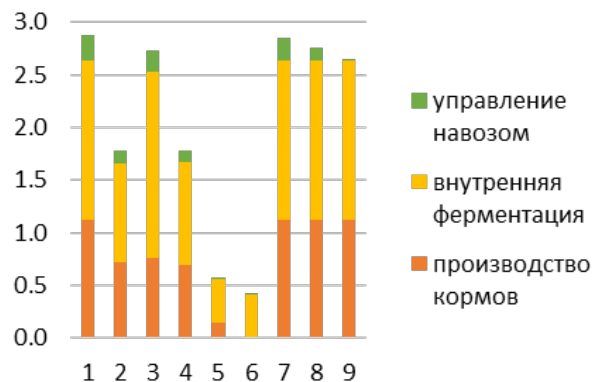


Средняя скорость: 0.05 т С/га в год (НЗ); 0.11, 0.16, 0.27 т С/га в год при увеличении поступления ОВ на 5, 10 и 20%, соответственно



# Углеродные калькуляторы как инструмент для оценки эмиссии парниковых газов от животноводства

Углеродные калькуляторы – программы для расчёта эмиссии парниковых газов (углеродного следа) от сельскохозяйственного производства в масштабах одного предприятия. Они созданы на основе методик МГЭИК, но пока не используются в России. Цель исследования состояла в анализе эффективности их применения для оценки эмиссии от животноводства и разработке рекомендаций по её снижению. В качестве объектов исследования были выбраны четыре наиболее распространенных калькулятора: Cool Farm Tool, AgRE-Calc, Farm Carbon Calculator и Ex-Act. Среди них наиболее удобным и эффективным был признан Cool Farm Tool. Тогда как в AgRE Calc и Farm Carbon Calculator недостаточно полно представлены технологические особенности выращивания животных. Ex-Act мало пригоден для сектора животноводства, поскольку базируется на изменении землепользования.

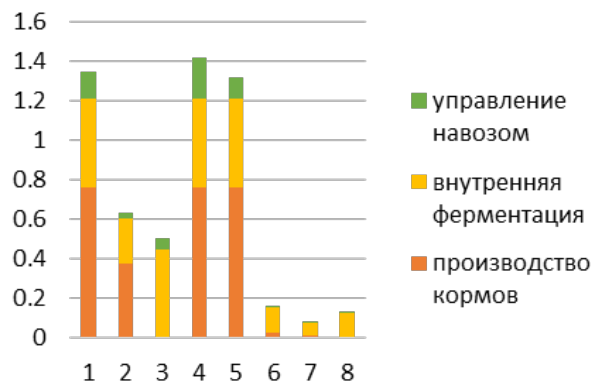


Результаты расчётов для коров на основе программы Cool Farm Tool, т CO<sub>2</sub>-экв./гол.·год  
1 – исходный вариант (полный рацион, навоз компостируется)

- 2 – половина поголовья
- 3 – без зелёного корма (силос, зерно, солома)
- 4 – без зелёного корма и силоса (зерно, солома)
- 5 – без зелёного корма, силоса, зерна (солома)
- 6 – полный выпас
- 7 – хранение навоза в твёрдом виде
- 8 – 50% навоза хранится, 50% разбрасывается
- 9 – разбрасывание навоза на полях

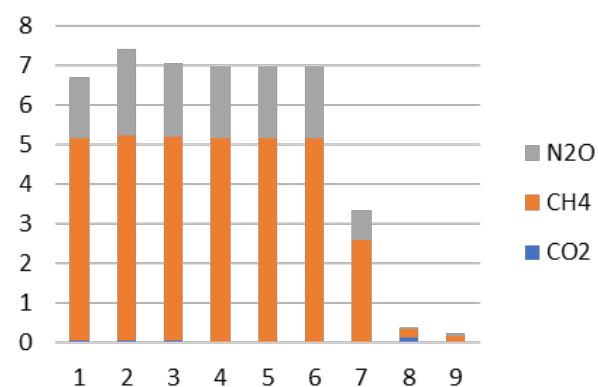
Суховеева О.Э. Углеродные калькуляторы как инструмент для оценки эмиссии парниковых газов от животноводства // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2021. Т. 497, № 1. С. 96-102. DOI: 10.31857/S2686739721030117

Sukhoveeva O.E. Carbon calculators as a tool for assessing greenhouse gas emissions from livestock // Doklady Earth Sciences. 2021. Vol. 497, no. 1. P. 266–271. DOI: 10.1134/S1028334X21030119



Результаты расчётов для лошадей и овец на основе программы Cool Farm Tool, т CO<sub>2</sub>-экв./гол.·год

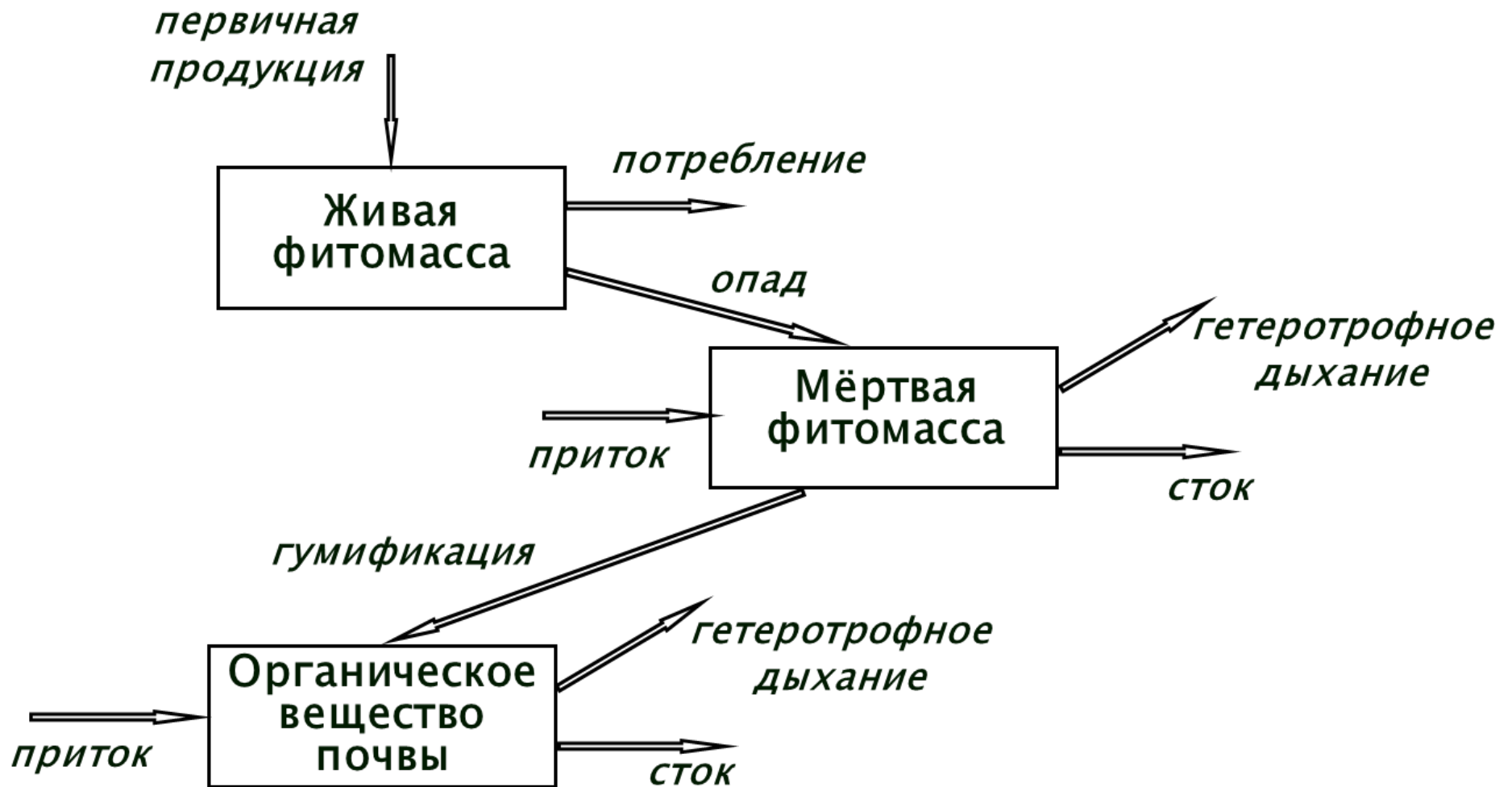
- Лошади
- 1 – исходный вариант (полный рацион, навоз остаётся на полях)
  - 2 – половина поголовья
  - 3 – полный выпас
  - 4 – навоз компостируется
  - 5 – 50% навоза хранится, 50% разбрасывается
- Овцы
- 6 – исходный вариант (выпас с подкормкой, навоз на полях)
  - 7 – половина поголовья
  - 8 – полный выпас



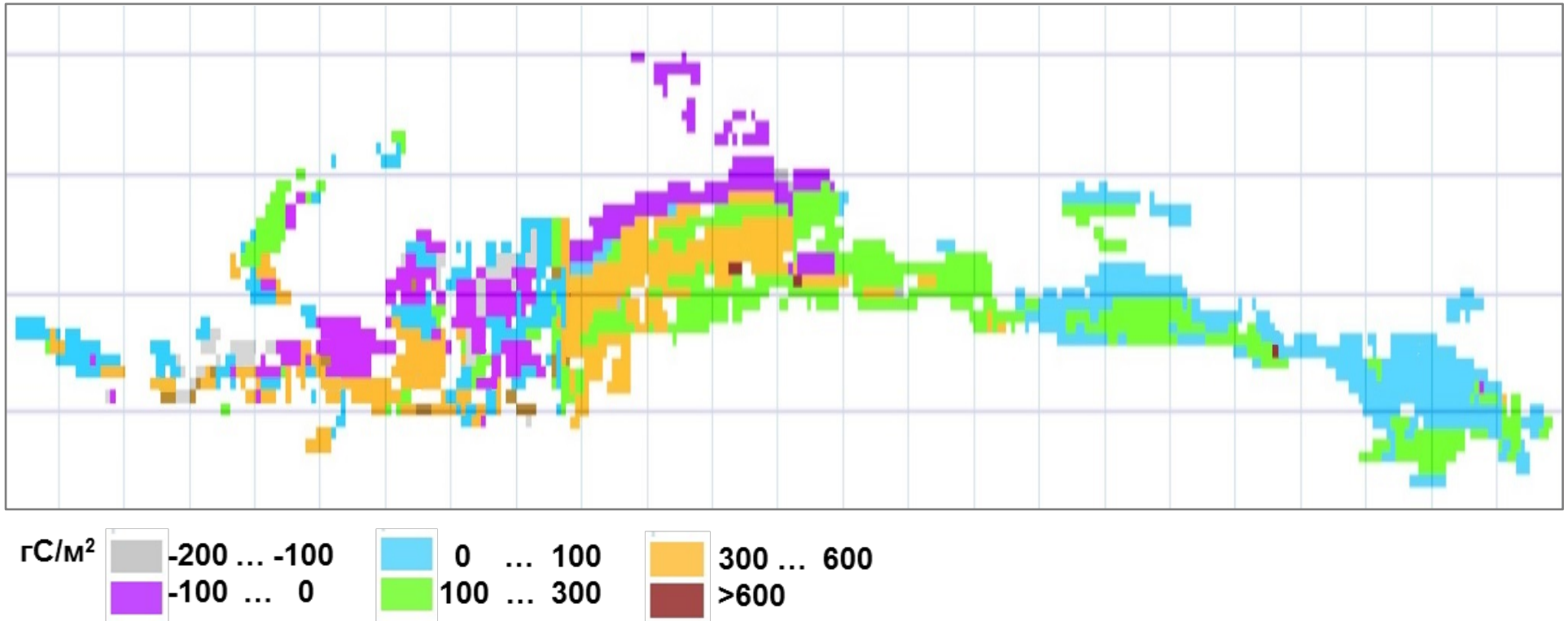
Результаты расчётов для коров и овец на основе программы AgRE Calc, т CO<sub>2</sub>-экв./гол.·год

- Коровы
- 1 – полный рацион, хранение навоза в твёрдом виде
  - 2 – полный рацион, разбрасывание навоза по полям
  - 3 – полный рацион, 50% навоза хранится, 50% разбрасывается
  - 4 – без зелёного корма (силос, зерно, солома)
  - 5 – без зелёного корма и силоса (зерно, солома)
  - 6 – без зелёного корма, силоса, зерна (солома)
  - 7 – половина поголовья
- Овцы
- 8 – выпас с подкормкой
  - 9 – полный выпас

# Модель углеродного цикла в тундровых и лесотундровых экосистемах



# Изменение запасов углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах 1980–2020 гг.



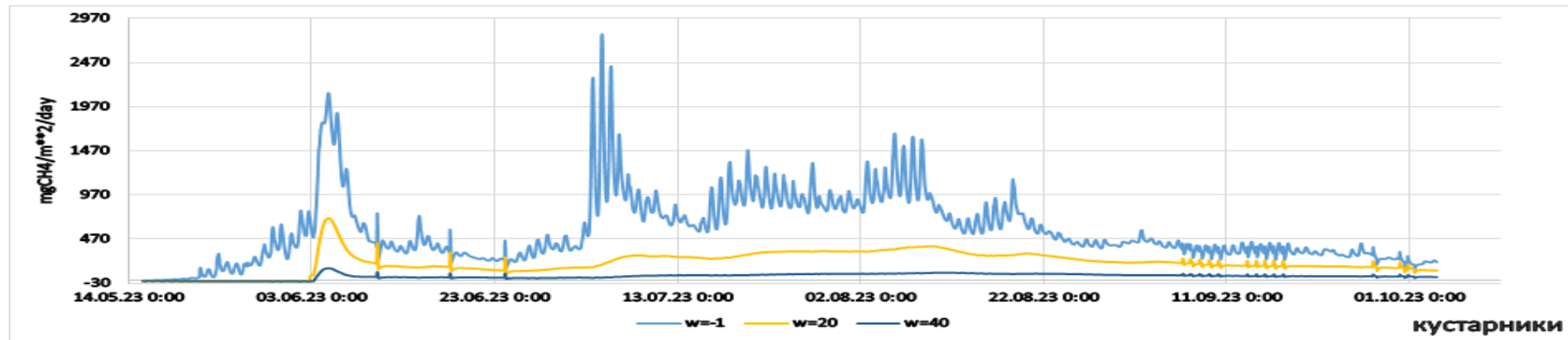
В живой фитомассе +0.9 ГтС

В мортмассе +2.2 ГтС

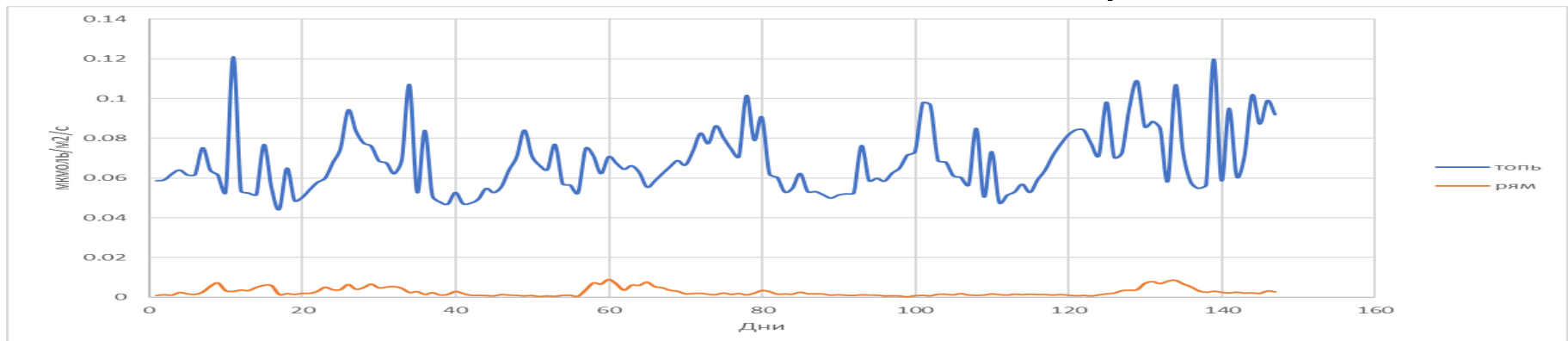
В органическом веществе почвы +0.8 ГтС

Увеличение общего запаса углерода на 3.9 ГтС

# Моделируемая эмиссия метана для участка Мухрино, при различном уровне грунтовых вод



## Поток метана по данным измерений



**!** Без описания подсеточного рельефа болота невозможно учесть вклад мочажин и топей.



# Основные результаты за 2023 г.

- Сформирован комплекс моделей для оценки бюджета углерода в основных типах наземных экосистем, представленных на территории Российской Федерации.
- Получены прогнозные оценки нетто-поглощения углерода на локальном, региональном и национальном уровнях в основных типах наземных экосистем при разных управленческих и климатических сценариях.

# Основные задачи на 2024 г.

- Прогноз нетто-поглощения углерода в лесных экосистемах на национальном уровне
- Прогноз накопления углерода в пахотных почвах при разных управленческих сценариях
- Прогноз нетто-поглощения углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах России при разных климатических сценариях
- Прогноз изменений компонент углеродного баланса болотных экосистем

## 2024+

- Интеграция с ИАС «Углерод-Э»
- Использование сценариев на основе 6-го Оценочного доклада МГЭИК, в т.ч. результатов расчётов по INM-CM-6

# Благодарим за внимание!

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).