



«УГЛЕРОД В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОНИТОРИНГ». РЕАЛИЗАЦИЯ  
ВАЖНЕЙШЕГО ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ  
«ЕДИНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ  
ВЕЩЕСТВ» (Москва, ИКИ РАН, 15–16 февраля 2023 г.)

# Разработка и научное обоснование системы учета бюджета углерода в агроэкосистемах Российской Федерации на основе наземных и дистанционных измерений

НИР 0439-2022-0021 (04.10.2022 – 31.12.2022)

Руководитель академик РАН А.Л. Иванов  
Ответственный исполнитель Д.Н. Козлов

И.Ю. Савин, В.С. Столбовой, А.Г. Болотов, Ю.А. Духанин, Н.Б. Хитров, В.А. Холодов, Б.М. Когут, Е.А. Иванова, А.В. Юдина, В.В. Ключева, Д.С. Фомин, П.Р. Цымбарович, М.С. Тимофеева, И.А. Валдес-Коровкин, Н.И. Лозбенев, П.М. Шилов, П.П. Филь, Ш.А. Хаматнуров, И.В. Данилин, И.А. Гуров, А.П. Жидкин, Е.Ю. Прудникова, А.Ю. Романовская, А.В. Чинилин, Г.В. Виндекер, П.Г. Грубина, Д.В. Шарычев, К.С. Орлова, Б.Ф. Апарин, Е.Ю. Сухачёва, Е.В. Мингареева, Ю.Р. Моргач, Е.В. Пятина, Д.А. Иванов, А.Д. Капсамун, Д.А. Вагунин, А.Е. Казьмин, И.О. Кортикова, Н.Р. Ермолаев, А.М. Гребенников, И.Е. Тамаровский, А.А. Карпченко, Л.А. Алексеева, С.М. Бецукова, В.Ю. Плыкина, М.Д. Карпова, В.Н. Кривцова, М.А. Клюкина, В.Н. Щербакова, Ю.А. Смирнова, В.Н. Щербакова, Ю.А. Смирнова

# Важнейший инновационный проект государственного значения (ВИП ГЗ)

## «Разработка системы мониторинга и учета данных о потоках парниковых газов и углеродного цикла в наземных экосистемах Российской Федерации»

Постановление Правительства РФ от 02 сентября 2022 г. № 2515-р и от 29 октября 2022 г. №3240-р

### Задачи ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева:

1. **разработка руководящих принципов обобщения параметров бюджета углерода агроэкосистем** на разных пространственных уровнях зонально-провинциального деления России в различных режимах сельскохозяйственного землепользования;
2. **разработка и апробация научно-методического, научно-технического, информационного и метрологического обеспечения наблюдательной сети** наземного учета и мониторинга параметров бюджета углерода, в том числе:
  - a. проектирование наблюдательной сети мониторинга экстенсивного и интенсивного уровня;
  - b. обоснование видов сельскохозяйственного использования земель, эффективная в отношении учета параметров бюджета углерода в агроэкосистемах;
  - c. методическое руководство по сбору и обработке данных о запасах и бюджету углерода на уровне площадки мониторинга в почвах, надземной и подземной фитомассе полевых культур и многолетних насаждений;
  - d. методическое руководство и регламент полевых и аналитических работ (отбор проб, пробоподготовка, определение органического и неорганического углерода, плотности почв; вычисления запасов, стандартные образцы, поверки лабораторного оборудования, проведения межлабораторных сличительных испытаний);
  - e. экспедиционные полевые наблюдения показателей бюджета углерода в агроэкосистемах Европейской части России (пашня-пастбище-сенокос-залежь);
3. разработка и научное **обоснование программы дистанционного мониторинга бюджета углерода** в сельскохозяйственных экосистемах России;
4. **подготовка научно-популярных материалов** и проведение мероприятий в области управления биогеохимическим циклом углерода в сельскохозяйственном землепользовании.



Научно-методическое обеспечение расчета объема поглощения парниковых газов в сельскохозяйственном землепользовании

- принципы регионального и национального обобщения компонентов бюджета углерода;
- равновесные запасы углерода в почвах в различных режимах использования;
- dC на фоне пространственной изменчивости
- аналитическое обеспечение мониторинга в климатических проектах
- динамика площадей угодий
- ...

Совершенствование нормативно-правовых и организационных форм сбора отраслевой отчетности в сельскохозяйственном землепользовании

- Минсельхоз РФ
- Агрохимическая служба МСХ
- Географическая сеть опытов с удобрениями
- ...

Рисунок 1.2 – Общая схема оценки антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов

- принципы регионального и национального обобщения компонентов бюджета углерода в агроэкосистемах России (на примере ЕТР);
- дельта С во времени и пространстве и аналитическое обеспечение мониторинга в климатических проектах
- просветительская работа в области мониторинга и управления биогеохимическим циклом углерода в сельскохозяйственном землепользовании

# Агрохимическая служба Минсельхоза России

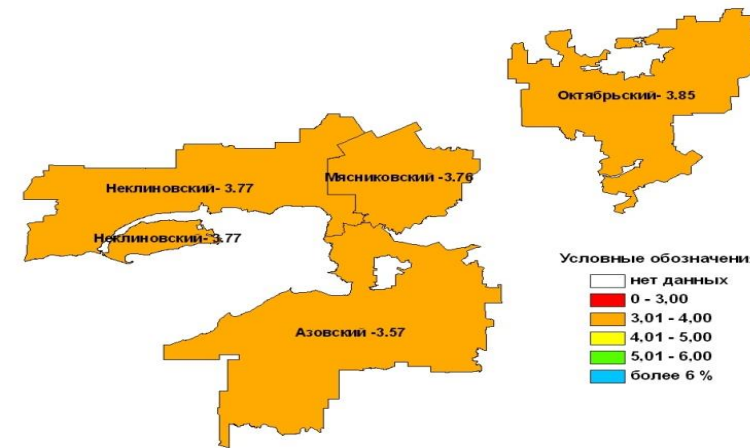
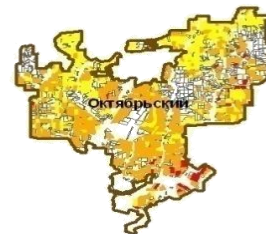
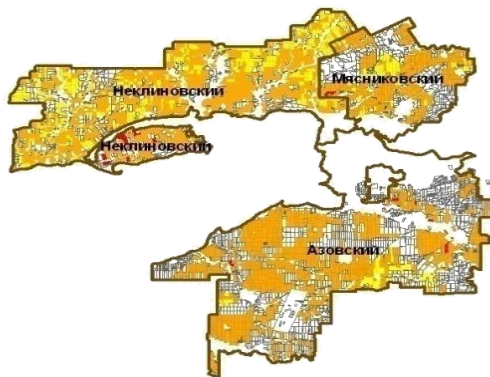
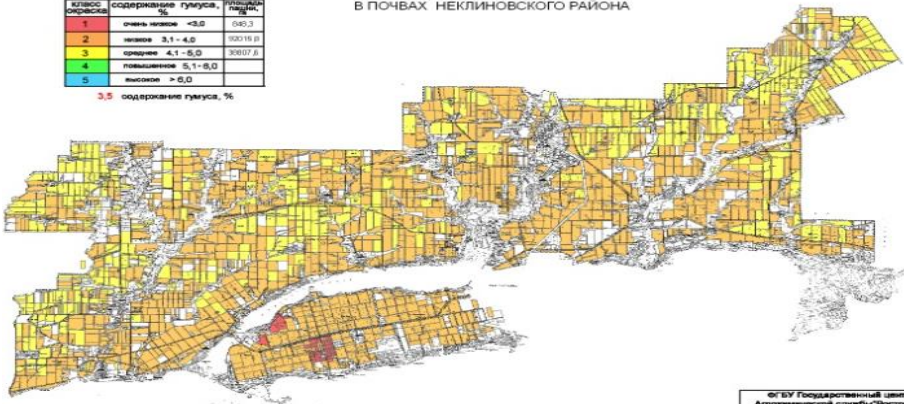
элементарный участок – поле – муниципальный район – регион – страна



| класс | содержание гумуса, % | площадь, тыс. га |
|-------|----------------------|------------------|
| 1     | очень низкое <3,0    | 646,3            |
| 2     | низкое 3,1 - 4,0     | 90016,8          |
| 3     | среднее 4,1 - 5,0    | 30007,8          |
| 4     | повышенное 5,1 - 6,0 |                  |
| 5     | высокое > 6,0        |                  |

3,5 содержание гумуса, %

КАРТОГРАММА  
СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА  
В ПОЧВАХ НЕКЛИНОВСКОГО РАЙОНА



Условные обозначения

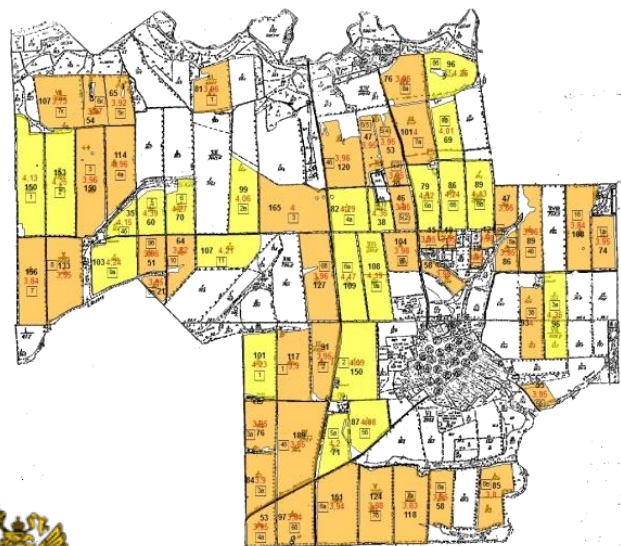
- нет данных
- 0 - 3,00
- 3,01 - 4,00
- 4,01 - 5,00
- 5,01 - 6,00
- 6,01 - 10,00

Условные обозначения

- нет данных
- 0 - 3,00
- 3,01 - 4,00
- 4,01 - 5,00
- 5,01 - 6,00
- более 6 %

КАРТОГРАММА  
СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА  
В ПОЧВАХ СПК колхоз "КОЛОС"  
МЯСНИКОВСКОГО РАЙОНА

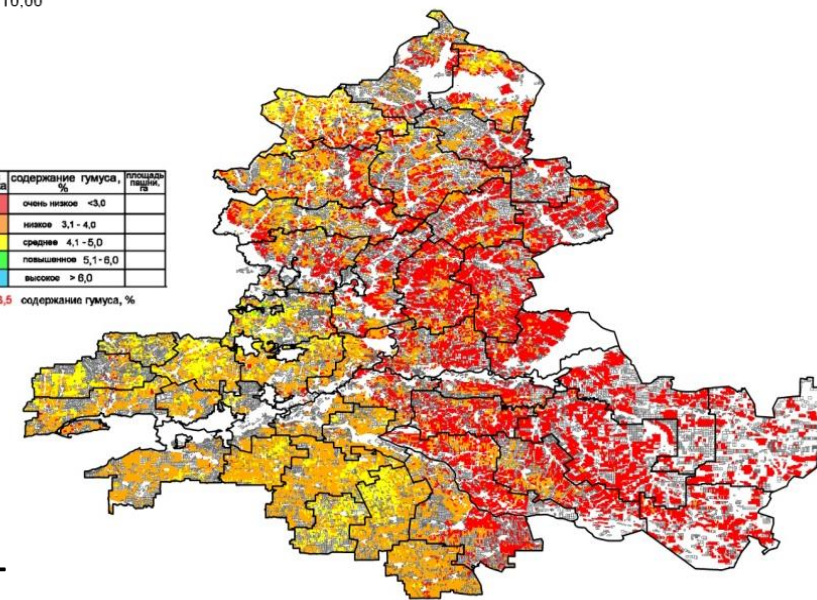
| ФГБУ Государственный центр агрохимической службы "Ростовский" |               |
|---|---------------|
| директор  | Иванов И.И.   |
| зам. директора  | Петров П.П.   |
| начальник отдела  | Сидоров С.С.  |
| начальник лаборатории   | Трофимов Т.Т. |
| год издания   | 2012          |



Содержание гумуса  
в пахотном  
горизонте почв  
земель сельско-  
хозяйственного  
назначения  
Ростовской области

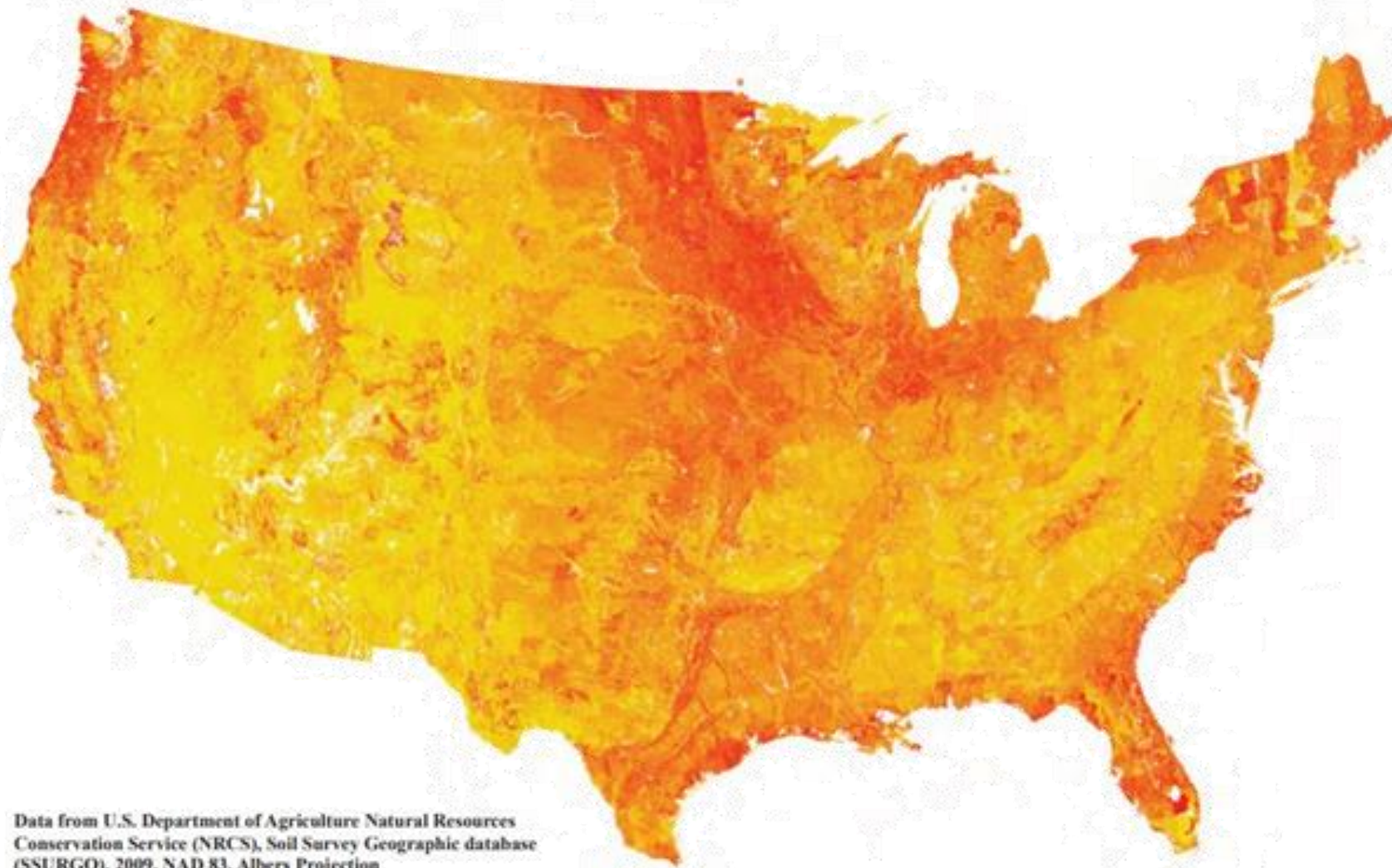
| класс | содержание гумуса, % | площадь, тыс. га |
|-------|----------------------|------------------|
| 1     | очень низкое <3,0    |                  |
| 2     | низкое 3,1 - 4,0     |                  |
| 3     | среднее 4,1 - 5,0    |                  |
| 4     | повышенное 5,1 - 6,0 |                  |
| 5     | высокое > 6,0        |                  |

3,5 содержание гумуса, %



Периодичность определения 1 раз в 5 лет





Data from U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service (NRCS), Soil Survey Geographic database (SSURGO), 2009, NAD 83, Albers Projection

**EXPLANATION**

Total soil organic carbon, in kilograms per square meter



# Разработка и научное обоснование программы дистанционного мониторинга бюджета углерода в сельскохозяйственных экосистемах России;

5.1 Возможности использования данных дистанционного зондирования для определения содержания углерода в почвах сельскохозяйственных угодий

- 5.1.1 Использование спектральной спутниковой информации
- 5.1.2 Использование спектральной спутниковой информации в оптическом диапазоне в сочетании с радарными данными
- 5.1.3 Использование спектральной информации в оптическом диапазоне в сочетании с лабораторными и полевыми данными спектрометрирования
- 5.1.4 Использование спектральной спутниковой информации в сочетании с не спектральными переменными
- 5.1.5 Использование спектральной информации, полученной с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

5.2 Мониторинг углерода в почвах на основе данных дистанционного зондирования Земли

5.3 Мониторинг содержания углерода в посевах и на сенокосах и пастбищах

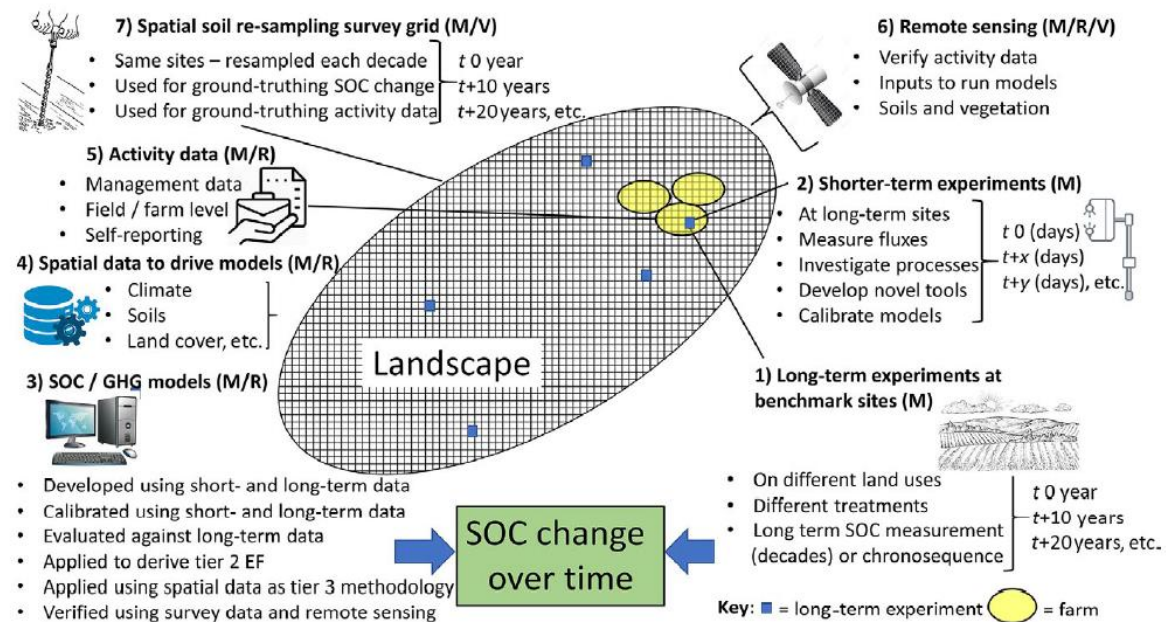
- 5.3.1 Возможности применения данных ДЗЗ для анализа содержания углерода в посевах, на сенокосах и пастбищах
  - 5.3.1.1 Источники данных
  - 5.3.1.2 Подходы к оценке содержания почвенного углерода на пашне, сенокосах и пастбищах
  - 5.3.1.3 Цифровая почвенная картография и моделирование Crop

5.4 Мониторинг эмиссии углерода посевами и другой сельскохозяйственной растительностью

- 5.4.1 Метод камер
- 5.4.2 Микрометеорологические методы
  - 5.4.2.1 Метод «гигантской камеры»
  - 5.4.2.2 Градиентный метод
  - 5.4.2.3 Метод «eddy correlation»
  - 5.4.2.4 Метод «eddy accumulation»
- 5.4.3 Метод космического зондирования;
- 5.4.4 Метод моделирования эмиссии парниковых газов почвами

5.5 Мониторинг внесения органических удобрений

5.6 Мониторинг выноса углерода реками



Компоненты глобальной MRV (измерение/мониторинг, отчетность и проверка) системы для ОУП (из Smith et al., 2019).

# Интегральная цифровая платформа «Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ».

## Геометрия.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов  
России (Общее количество полигонов 25 611)



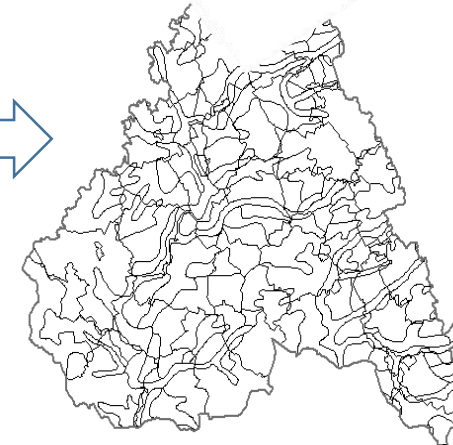
Экспликация геометрической части БД ЕГРПР  
Воронежской области



ИЦП «Почвенные ресурсы сельскохозяйственных  
угодий РФ»



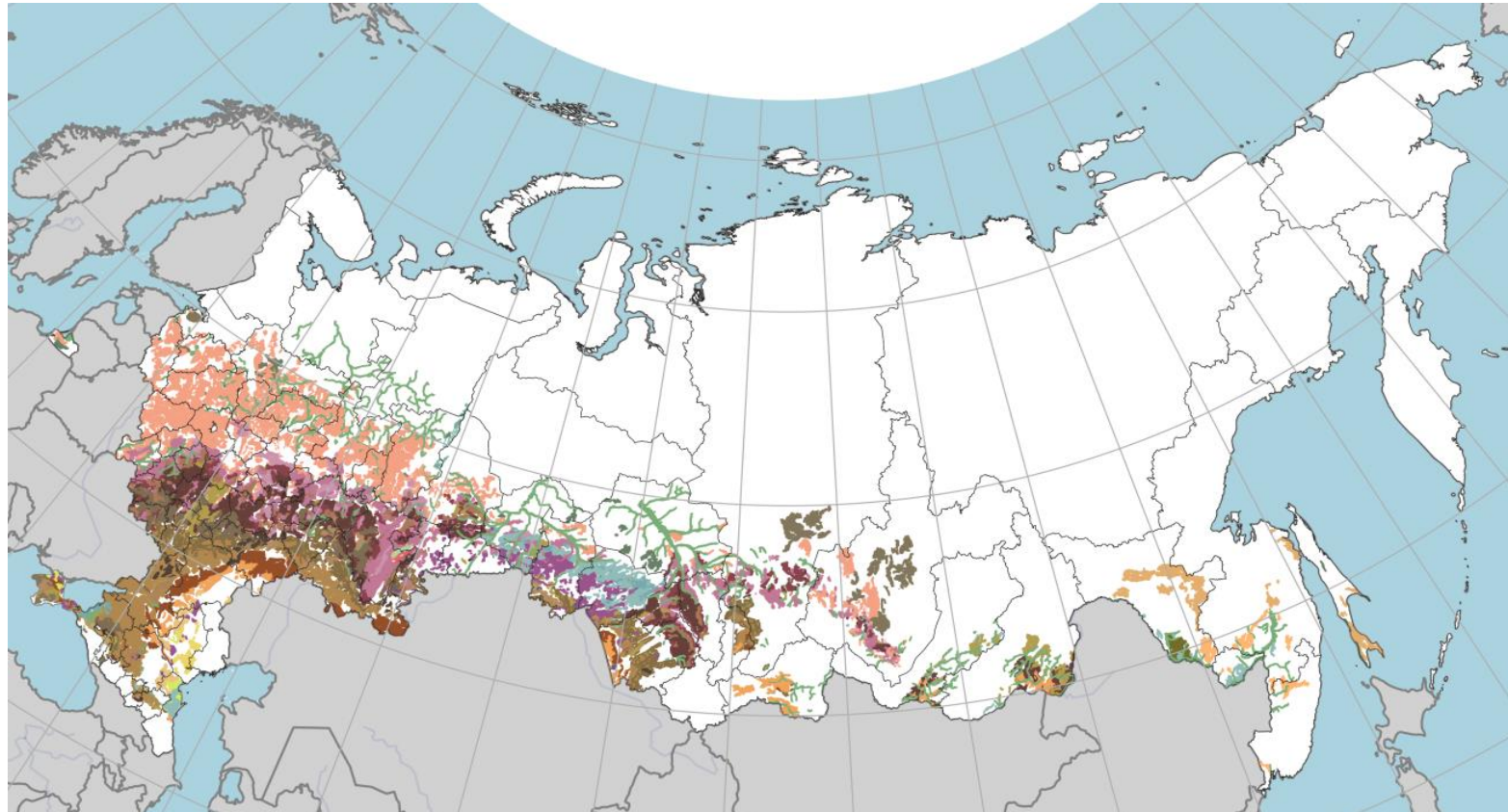
Экспликация геометрической части ИЦП ПРСХ  
Воронежской области (~М 1:300 000-1:500000)





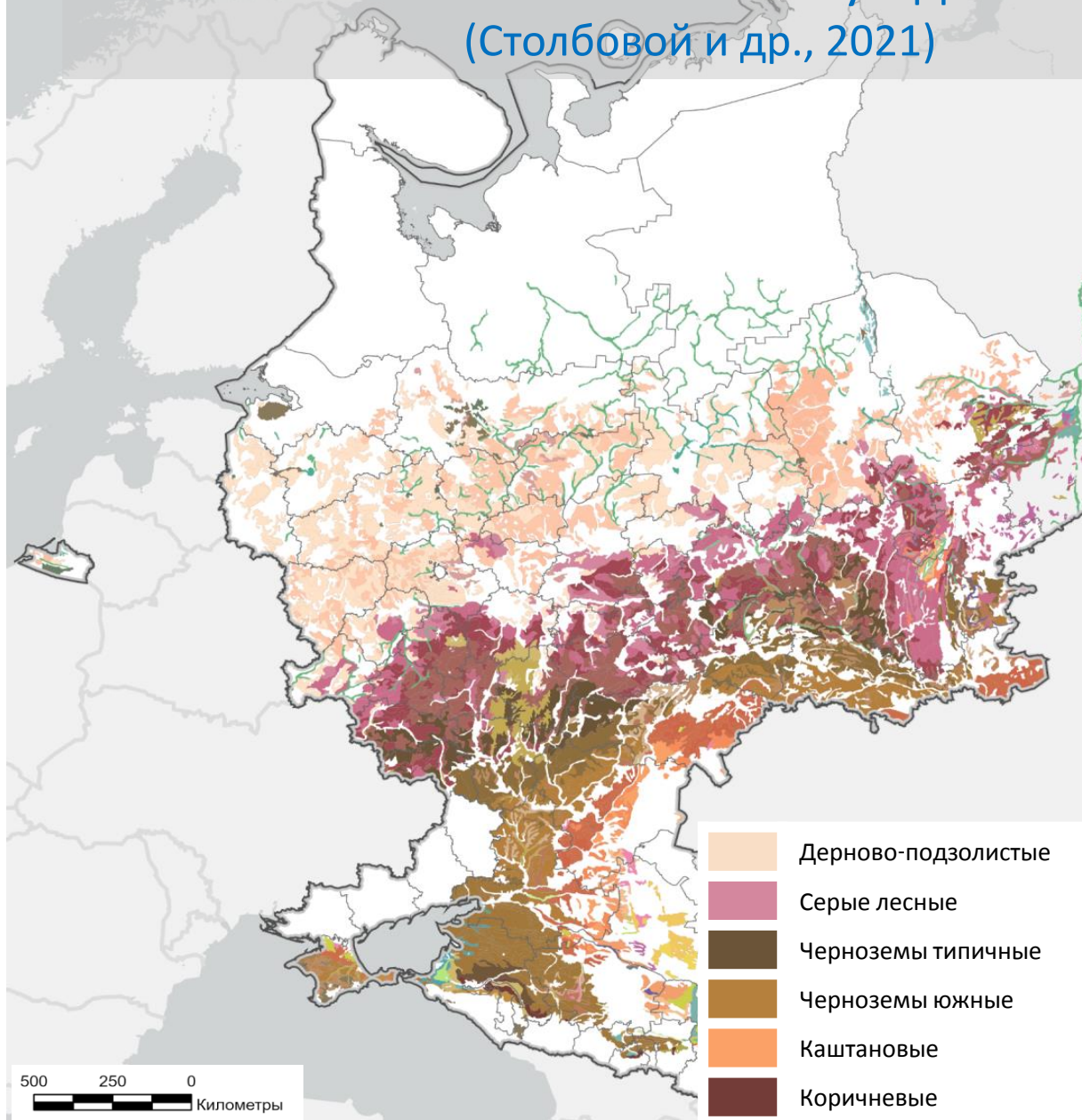
# Интегральная цифровая платформа «Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ».

## Экспликация слоя «Почвы»



|                     |                                |                                 |                   |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Дерново-подзолистые | Темно-серые лесные             | Черноземы остаточно-карбонатные | Светло-каштановые |
| Буро-таежные        | Черноземы (без разделения)     | Черноземы осолоделые            | Лугово-каштановые |
| Дерново-таежные     | Черноземы обыкновенные         | Черноземы солонцеватые          | Бурые             |
| Дерново-карбонатные | Черноземы южные                | Черноземы слитые                | Лугово-болотные   |
| Дерново-глеевые     | Черноземы оподзоленные         | Лугово-черноземные              | Луговые           |
| Бурые лесные        | Черноземы выщелоченные         | Лугово-черноземовидные          | Солонцы           |
| Светло-серые лесные | Черноземы типичные             | Темно-каштановые                | Солончаки         |
| Серые лесные        | Черноземы южные и обыкновенные | Каштановые                      | Пойменные         |

# ГИС-платформа «Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ» (Столбовой и др., 2021)



54695 картографических единиц  
10107 типологических единиц качества почв  
Полнота и детальность цифровой карты (слоя «почвы») соответствует географическому масштабу 1:300 000 – 1:500 000, что позволяет проецировать ТЕКП с достаточной детальностью на субъекты РФ.

- концентрация органического углерода и плотность почв из справочника Физико-химических свойств почв сельскохозяйственного назначения (1996)
- площади сельскохозяйственных угодий их данных статистического учета муниципальных образований РФ.

## Содержание углерода в 0,3 м слое пахотных почв ЕТР

Решения РФ в области производства углеродных единиц будут признаваться на международных рынках, если они будут основываться на общепринятых международных методиках (IPCC 1996; 2006) и инструментах MRV (Измерение, Отчетность, Верификация).

Содержание углерода

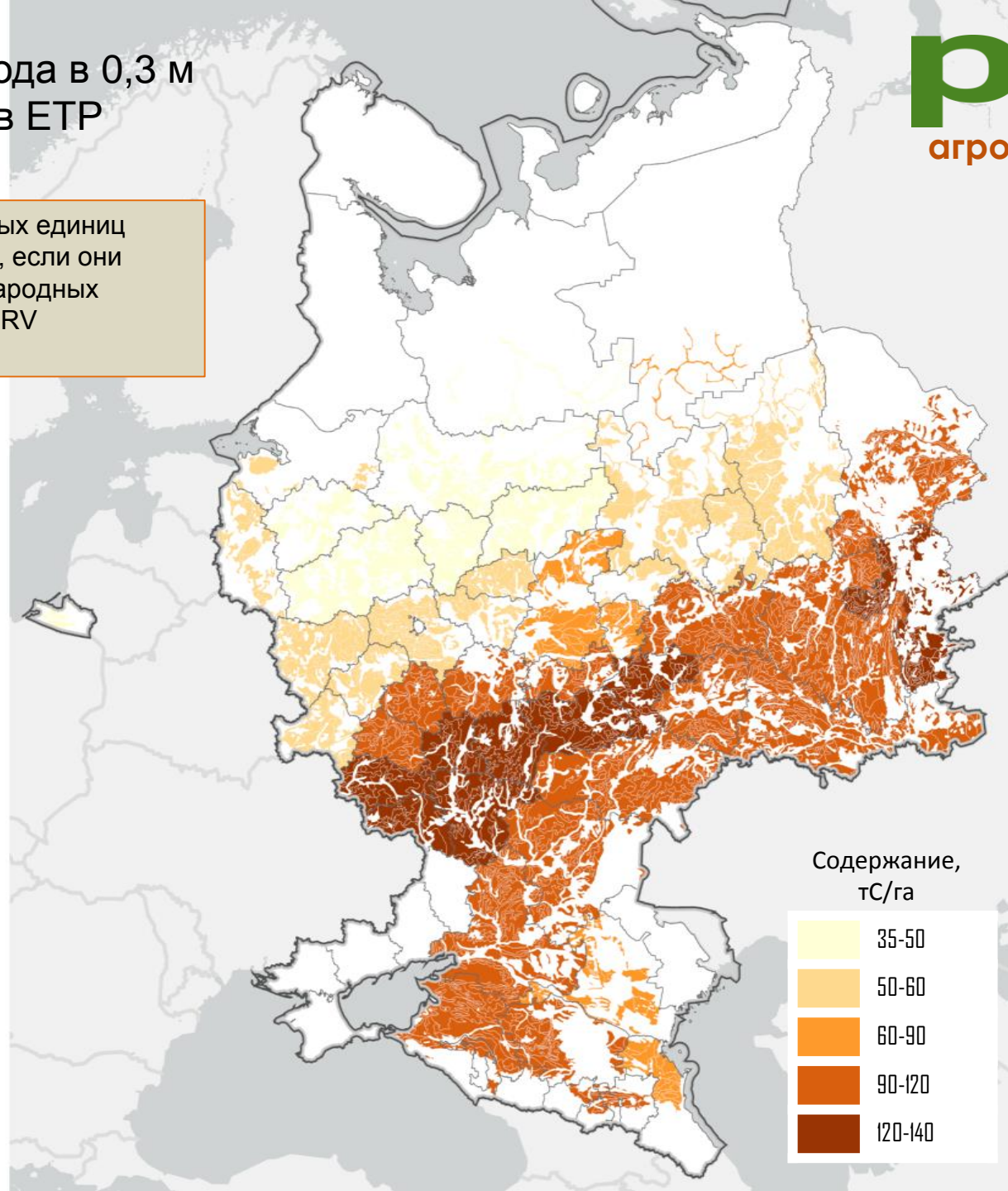
Объемный вес почвы

Мощность слоя почв

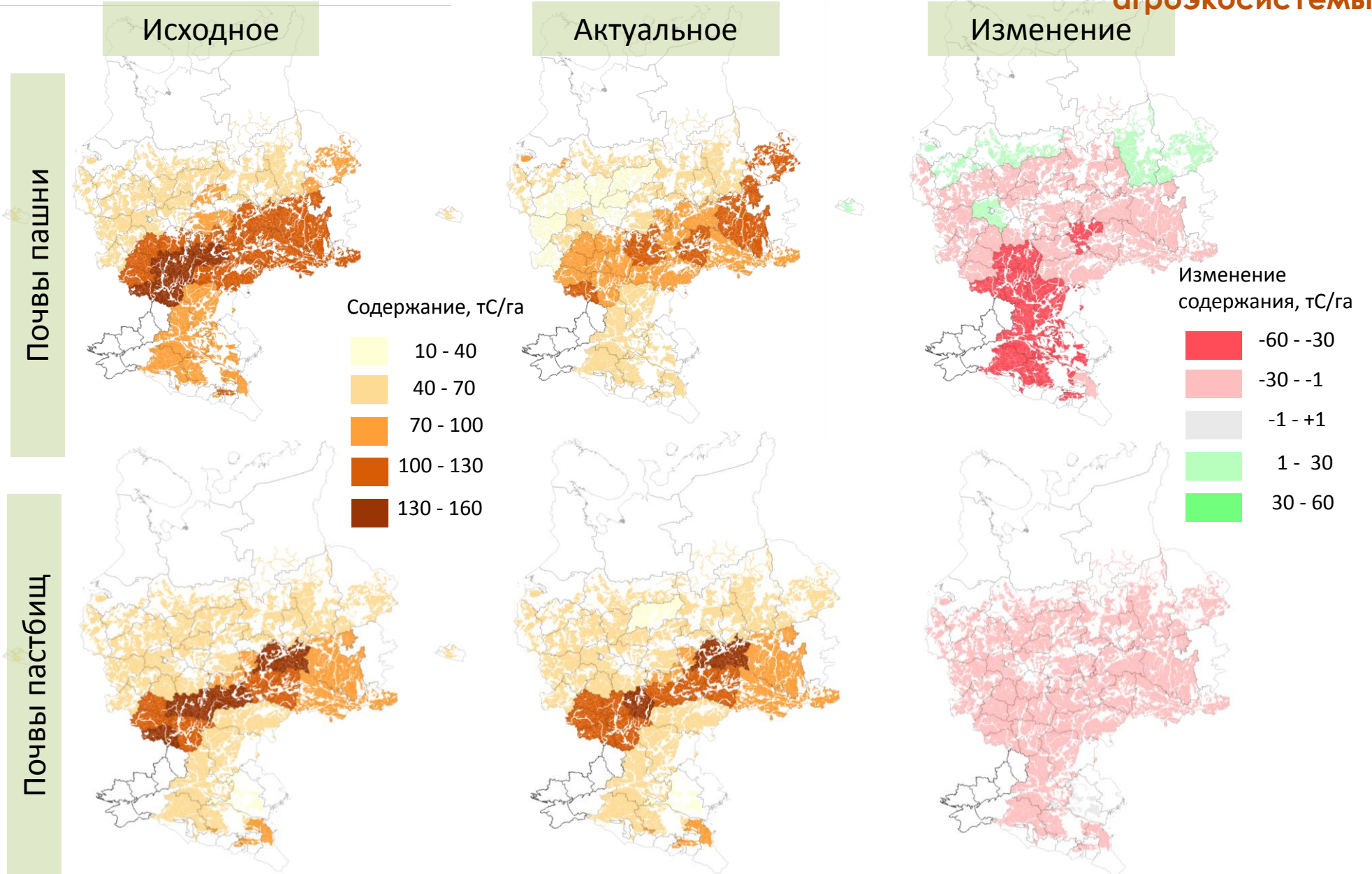
Содержание камней

Запасы углерода в слое почв на единицу площади

Стандартный метод расчета содержания углерода в почвах



# Динамика содержания углерода в пахотных и пастбищных почвах ЕТР

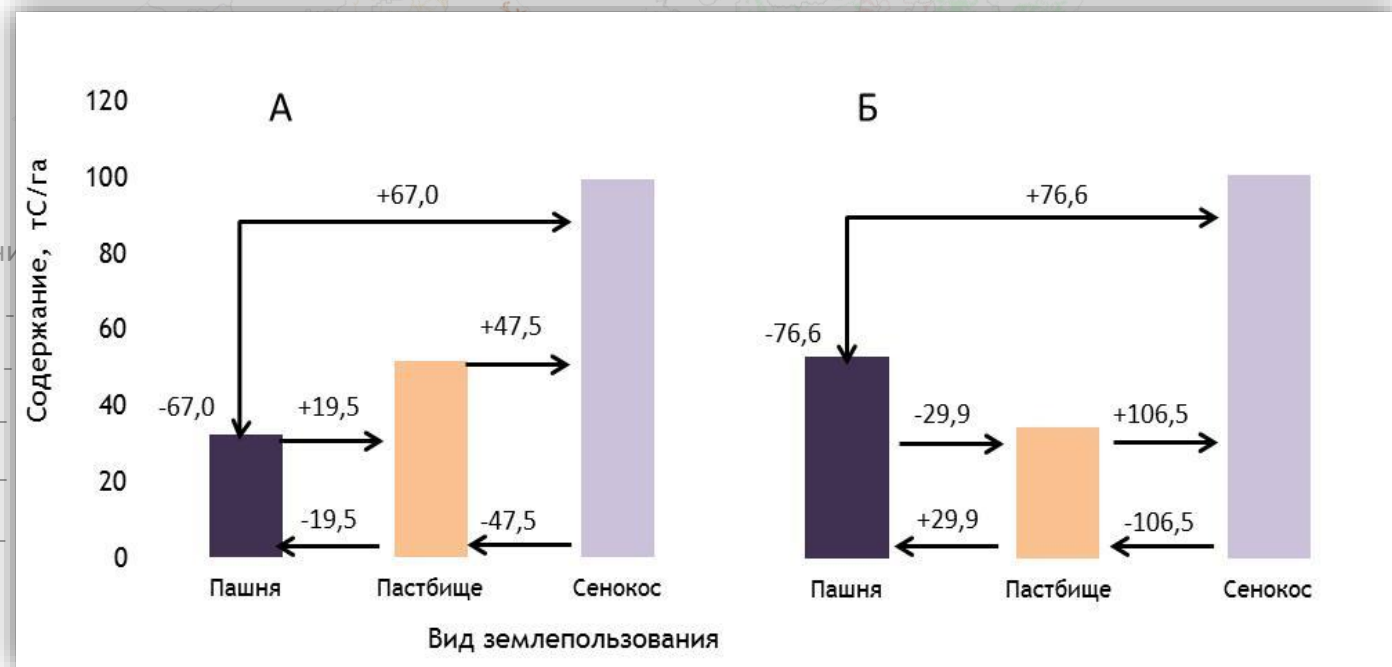
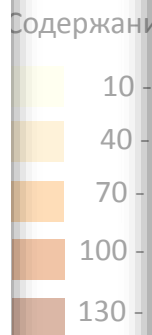
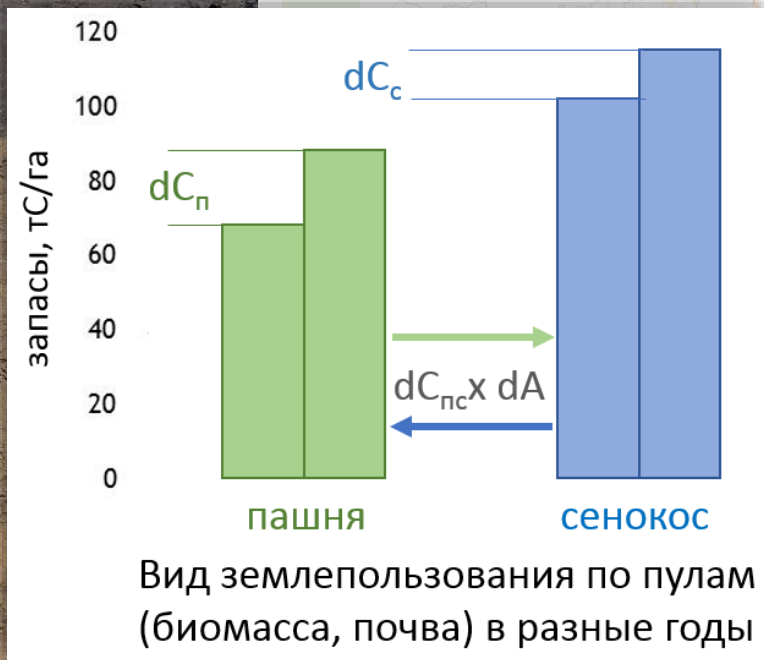


# Динамика содержания углерода в пахотных и пастбищных почвах ЕТР

Исходное

Актуальное

Изменение



Почвы пастби

Содержание углерода в слое 0,3 м:  
А. Владимирская область, Б. Рязанская область.

- принципы регионального и национального обобщения компонентов бюджета углерода в агроэкосистемах России (на примере ЕТР);
- дельта С во времени и пространстве и аналитическое обеспечение мониторинга в климатических проектах
- просветительская работа в области мониторинга и управления биогеохимическим циклом углерода в сельскохозяйственном землепользовании

# БЮДЖЕТ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ АГРОЭКОСИСТЕМ

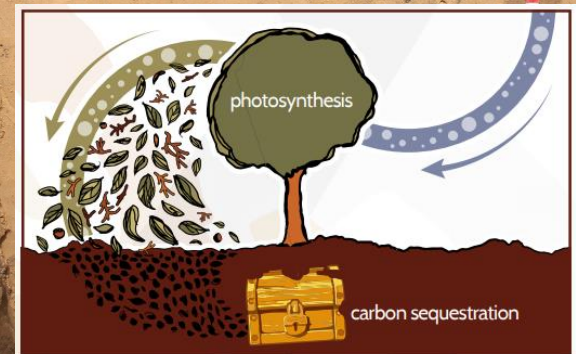


FIG. 5: THE WORLD'S SOILS CAN ACT AS A CARBON SINK



Предельные темпы секвестрации углерода в пахотном слое почв при разных практиках земледелия не превышают 1 тС/га в год [118].

За 20-лет такие темпы соответствуют увеличению содержания углерода в пахотном горизонте почв средней плотностью 1,3 г/см<sup>3</sup> всего **на 0,5%**.

Эта предельно малая величина, достоверность оценки которой предъявляет высокие требования к методике проведения почвенного опробования, пробоподготовки и аналитических работ.

на фоне пространственной и сезонной изменчивости запасов С, и его аналитических ошибок их определения

С этой целью выполнен анализ существующих подходов по сбору и обработке данных о запасах и бюджету углерода в почвах на уровне площадки мониторинга и подготовлена первая версия методического руководства проведения полевых, лабораторных и аналитических работ.



По авторитетному мнению Б.А. Доспехова  
*«Анализ смешанного образца не дает экспериментатору возможности рассчитать статистические критерии для объективного суждения о достоверности различий по вариантам полевого опыта.»*  
(Доспехов, Мазурина, 1970, с. 94)

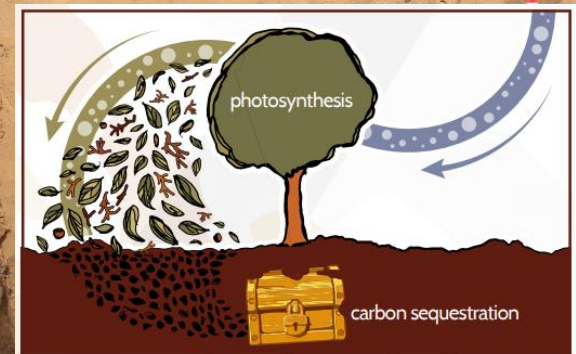


FIG. 5: THE WORLD'S SOILS CAN ACT AS A CARBON SINK

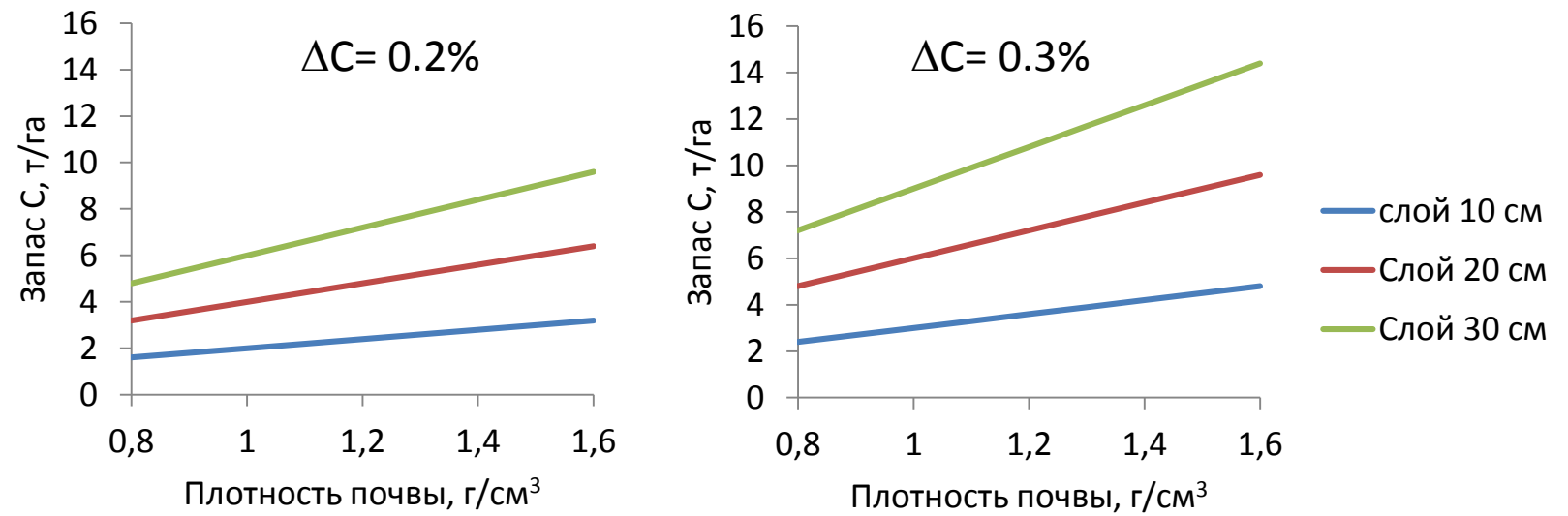




**Запас углерода ( $Z_C$ )**, выраженный в т/га, равен произведению содержания углерода в почве (C, %), мощности слоя (h, см) и плотности почвы ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>):

$$Z_C = C h \rho$$

Поэтому минимальная значимая разница будет больше



В международных руководствах (FAO, 2020) для оценки изменения запасов углерода **принята мощность слоя 30 см.**

**Следствие:** в слое 0-30 см в зависимости от плотности почвы минимальная значимая разность запасов углерода в два срока составляет **от 6 до 14 т/га.**

Уменьшение этой величины возможно при уменьшении мощности слоя или за счет увеличения повторности

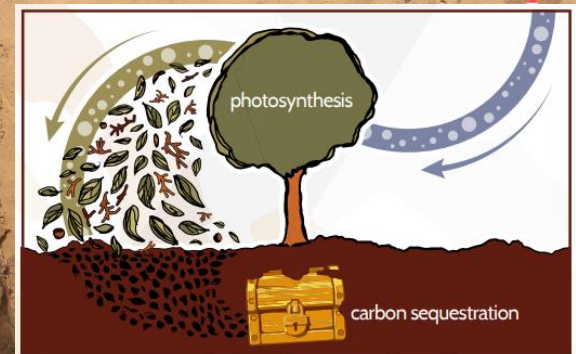


FIG. 5: THE WORLD'S SOILS CAN ACT AS A CARBON SINK

# МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ О ЗАПАСАХ УГЛЕРОДА НА УРОВНЕ ПЛОЩАДКИ МОНИТОРИНГА В ПОЧВАХ

1. Методика отбора образцов почв для определения содержания, запасов органического и неорганического углерода и плотности

- 1.1. Минимальная значимая разница содержания и запасов углерода при оценке многолетней динамики показателей
- 1.2. Планирование численности выборки образцов почв в пространстве
- 1.3. Схемы расположения площадок мониторинга в пределах отдельного участка, характеризующегося одним видом угодья с однотипной историей использования не менее 10-15 лет и однотипной неоднородностью почвенного покрова
- 1.4. Схемы расположения точек опробования в пределах одной площадки мониторинга
- 1.5. Глубина отбора образцов в зависимости от типа почв
- 1.6. Глубина отбора образцов в зависимости от вида угодья
- 1.7. Способы отбора образцов почв
- 1.8. Сроки отбора образцов почв в течение года и периодичность в многолетнем режиме
- 1.9. Сведения об образце почв и площадке мониторинга, необходимые для формирования ведомостей образцов для их передачи в лабораторию и записи в базу данных для последующей камеральной обработки результатов лабораторных анализов.

2. Обработка данных о запасах и бюджете углерода в почвах на уровне площадки мониторинга

- 2.1. расчет запаса углерода в почвах
- 2.2. статистические задачи обработки данных о содержании, запасах углерода и плотности почв по результатам одной площадки мониторинга, полученными в один срок по времени
- 2.3. статистические задачи обработки данных нескольких площадок мониторинга, характеризующих одно угодье в один срок по времени
- 2.4. сравнение запасов углерода разных угодий
- 2.5. оценки изменения запасов углерода на одной площадке мониторинга или на одном угодье во времени

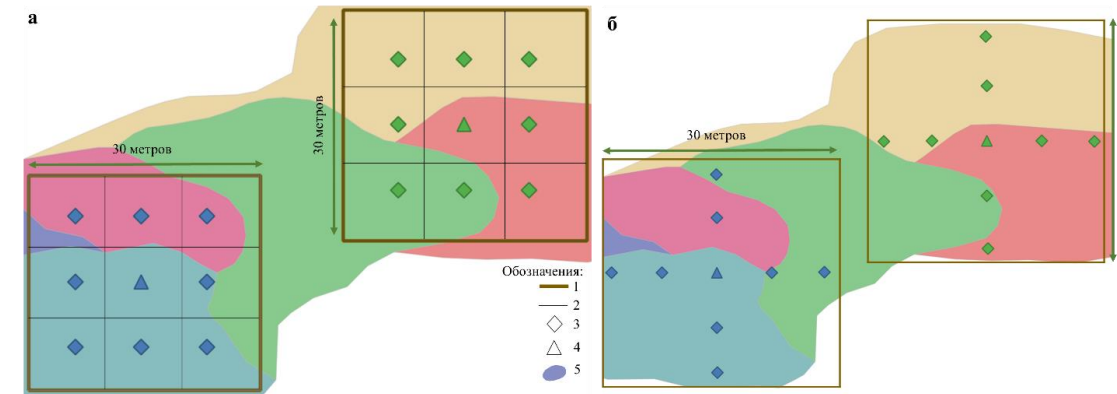


Схема размещения точек опробования почв в пределах площадки мониторинга с мелкопятнистыми почвенными комбинациями: а) по регулярной сетке, б) крестом: 1 – границы площадки; 2 – условные границы элементарных участков; 3 – точки отбора на содержание органического углерода; 4 – точки отбора на содержание органического углерода и плотности почв; 5 – элементарные почвенные ареалы.

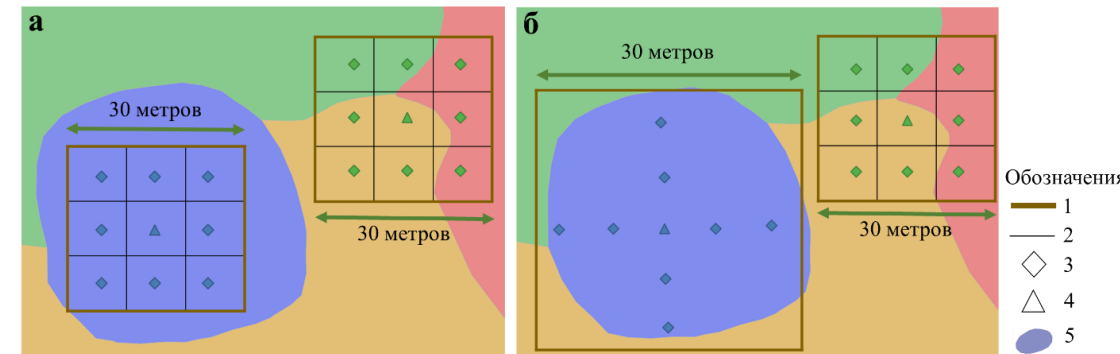


Схема размещения площадок отбора на почвенных комбинациях с относительно регулярной встречаемостью округлых ареалов: а) по регулярной сетке, б) крестом. Цифрами обозначены: 1 – границы площадки, 2 – границы элементарных участков, 3 – точки отбора на содержание органического углерода, 4 – точки отбора на содержание органического углерода и плотности почв, 5 – элементарные почвенные ареалы.

# БЮДЖЕТ УГЛЕРОДА В АГРОЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ

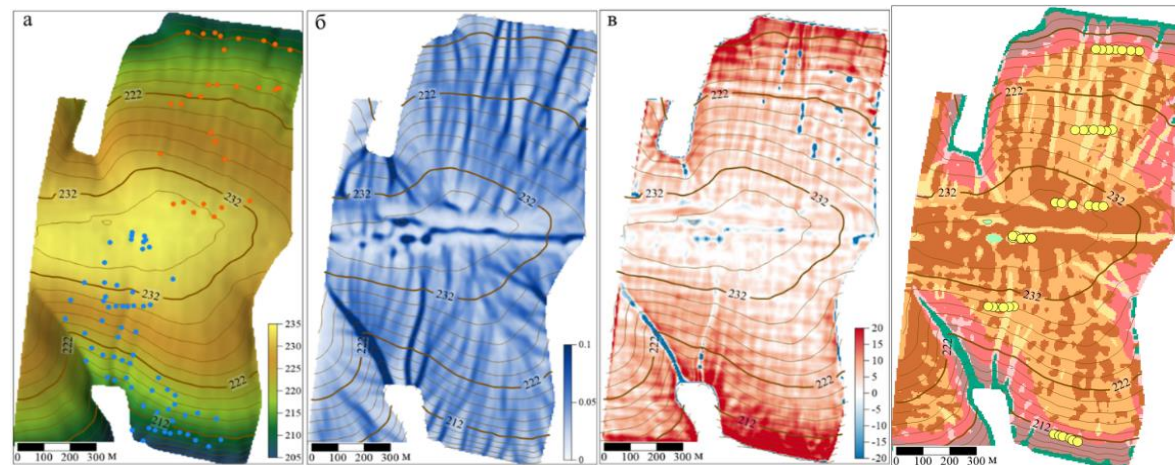
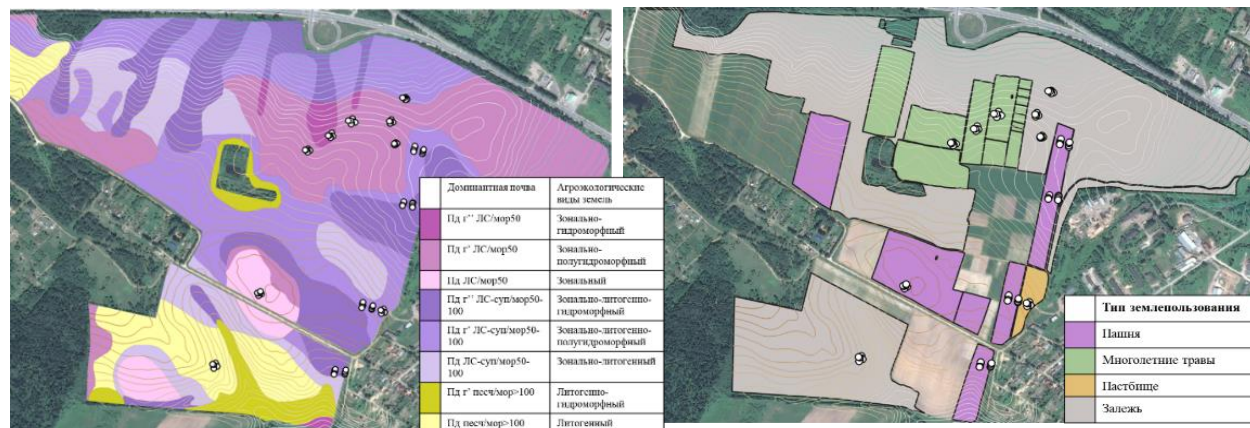
## Проведена апробация регламента отбора образцов в разном режиме сельскохозяйственного использования (пашня–сенокос–пастбище–залежь)

в ареале дерново-подзолистых почв на тестовом полигоне «Эммаус» Всероссийского НИИ мелиорируемых земель – филиала ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева (Тверская область, 19-21.10.2022 г.)

126 точек, 156 образцов на плотность, 621 образец на углерод

в ареале черноземных почв на тестовом полигоне Института Географии РАН (Курская область, 04-07.11.2022 г.)

54 точки, 300 образцов на плотность, 540 образцов на углерод



# ПРОТОКОЛ ПРОБОПОДГОТОВКИ

- лаборатории биологии и биохимии почв Почвенного института им.В.В.Докучаева,
- межгосударственного стандарта ГОСТ 26213-2021 и ГОСТ ISO 11464-2015
- протокол MRV (FAO, 2019)

Пропись пробоподготовки почвы:

1. тщательно перемешивают всю массу образца почвы (300 г.), аккуратно раздавливают резиновым пестиком комки, и распределяют ее тонким слоем на поддоне, который не будет влиять на состав анализируемой почвы. Весь почвенный материал пропускают через сито 2 мм.
2. почвенную массу делят на 4 примерно равные части. Из каждой части отбирают пробы. Повторяют циклично данную процедуру до получения требуемого количества почвы: сначала до массы 100 г, затем до массы 20 г, и далее до окончательной пробы - 6 г
3. из пропущенной через сито пробы удаляют пинцетом видимые невооруженным глазом органические остатки (неразложившиеся корни, растительные остатки и т.п.), растирают почву и пропускают через сито 0.25 мм.

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА



Рис. 1. Государственные стандартные образцы СП-1 (Курский чернозем) и СП-2 (Московская дерново-подзолистая почва)



Рис. 2. Анализатор углерода Метавак CS-30

Рекомендованы следующие режимы сжигания оптимальной навески почвы ( $\approx 500$  мг): температура –  $1000$  °С, время – 3-4 мин. Производительность автоматического анализатора составила 100 анализов в рабочую смену. Проведена калибровка прибора с помощью двух государственных стандартных образцов почвенных масс, ранее созданных и аттестованных в Почвенном институте им. В.В.Докучаева

**Табл.3 Метрологические характеристики содержания органического углерода в государственных стандартных образцах (ГСО) почвенных масс**

| Наименование образца | Аттестованные значения ГСО – массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность аттестованного значения ГСО при $P=0,95\%$ |
|----------------------|--|---|
| СП-1, ООКО152        | 3,6  | 0,2   |
| СП-2, ООКО153        | 0,55   | 0,07  |

**Табл. 4 Содержания органического углерода в ГСО почвенных масс, определенные на анализаторе углерода Метавак CS-30**

| Наименование образца | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность измеренного значения, при $P=0,95\%$ |
|----------------------|-----------------------------|---|
| СП-1, ООКО152        | 3,665                       | 0,015   |
| СП-2, ООКО153        | 0,565                       | 0,006   |

## Структура затрат для проведения анализов по определению углерода в почве различными методами, руб. за 1 образец \*

| Наименование затрат  | Тюрин **<br>ГОСТ 26213-2021 | Метавак CS-30 | LECO или CUBE |
|--|-----------------------------|---------------|---------------|
| <b>Амортизация оборудования</b>  | 8,6                         | 12            | 59,5          |
| <b>Затраты на реактивы</b>   | 28,1                        | 6,9           | 350           |
| <b>Затраты на лабораторную посуду</b>  | 1,4                         | 0             | 0             |
| <b>Затраты на электроэнергию</b>   | 0,2                         | 2,1           | 2             |
| <b>Заработная плата лаборанта (часовая тарифная ставка за 1 час= 268 руб.)</b> | 77                          | 22            | 49,5          |
| <b>Отчисления на социальные нужды</b>  | 26                          | 7,5           | 17            |
| <b>Накладные затраты</b>   | 19,4                        | 5,5           | 12            |
| <b>Прочие расходы</b>  | 8                           | 3             | 24,5          |
| <b>Себестоимость анализа</b>   | <b>168,70</b>               | <b>59,00</b>  | <b>514,5</b>  |

\* Методика расчета себестоимости анализа для специальности "Аналитический контроль химических соединений"

\*\* ГОСТ 26213-2021 «Почвы. Методы определения органического вещества» (Фотометрический метод)

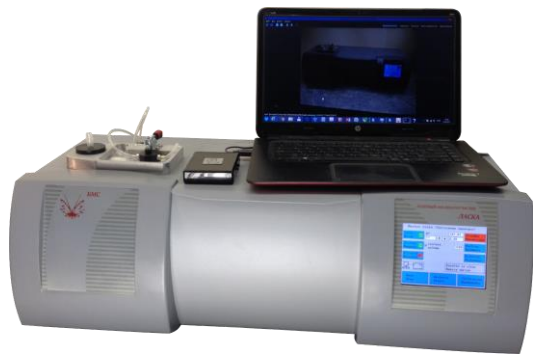


подготовка научно-популярных материалов и проведение мероприятий, нацеленных на повышение образованности населения, бизнеса и управленческих структур различного уровня в области мониторинга и управления биогеохимическим циклом углерода в сельскохозяйственном землепользовании.

- разработана концепция, структура и содержание тематической экспозиции на площадке Центрального музея почвоведения – филиала ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им В.В. Докучаева (г. Санкт-Петербург).
- подготовлен проект архитектурно-художественного оформления нового инновационного научно-популярного экспозиционного комплекса «Лаборатория агроэкосистем: Климат – Почва – Углерод»
  - информационная зона
  - информационно-аналитическая зона
  - интерактивная зона.



# Центр коллективного пользования "Углерод в почвах агроэкосистем" на базе ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева (2023)



#360.01



#425.67

**Мотомолот REDI Boss**  
Мото-молот REDI босс с 3 1/8" цилиндром  
Включает в себя 2-дюймовую редукционную втулку для 3 1/8" цилиндров.



#213.93



#213.95

Gas Powered REDI Boss Hammer

| Арт.#  | Наименование              | Цена        |
|--------|---------------------------|-------------|
| 213.93 | REDI Boss Hammer          | \$ 4 677,50 |
| 213.95 | Carrying Case w/ fuel can | \$ 597,00   |







«УГЛЕРОД В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОНИТОРИНГ». РЕАЛИЗАЦИЯ  
ВАЖНЕЙШЕГО ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ  
«ЕДИНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ  
ВЕЩЕСТВ» (Москва, ИКИ РАН, 15–16 февраля 2023 г.)

# Разработка и научное обоснование системы учета бюджета углерода в агроэкосистемах Российской Федерации на основе наземных и дистанционных измерений

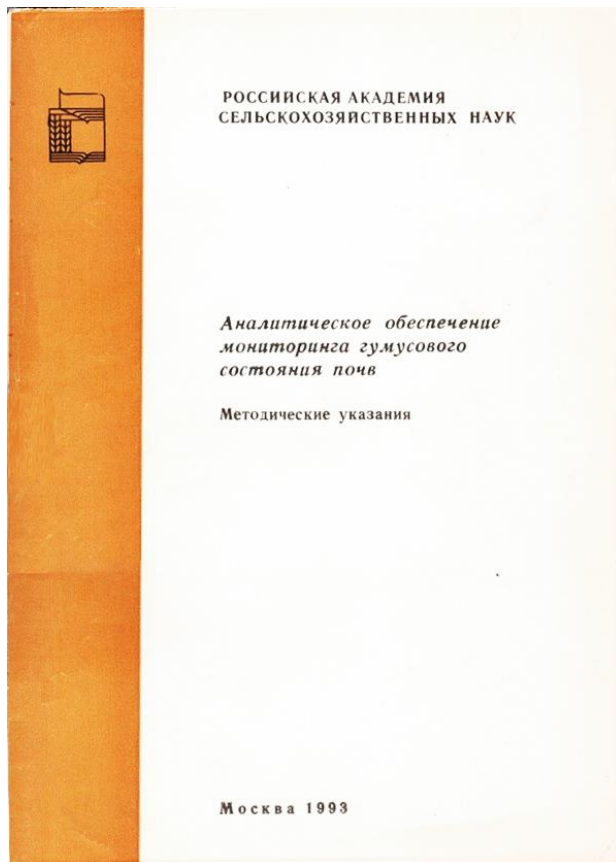
НИР 0439-2022-0021 (04.10.2022 – 31.12.2022)

Руководитель академик РАН А.Л. Иванов  
Ответственный исполнитель Д.Н. Козлов

И.Ю. Савин, В.С. Столбовой, А.Г. Болотов, Ю.А. Духанин, Н.Б. Хитров, В.А. Холодов, Б.М. Когут, Е.А. Иванова, А.В. Юдина, В.В. Ключева, Д.С. Фомин, П.Р. Цымбарович, М.С. Тимофеева, И.А. Валдес-Коровкин, Н.И. Лозбенев, П.М. Шилов, П.П. Филь, Ш.А. Хаматнуров, И.В. Данилин, И.А. Гуров, А.П. Жидкин, Е.Ю. Прудникова, А.Ю. Романовская, А.В. Чинилин, Г.В. Виндекер, П.Г. Грубина, Д.В. Шарычев, К.С. Орлова, Б.Ф. Апарин, Е.Ю. Сухачёва, Е.В. Мингареева, Ю.Р. Моргач, Е.В. Пятина, Д.А. Иванов, А.Д. Капсамун, Д.А. Вагунин, А.Е. Казьмин, И.О. Кортикова, Н.Р. Ермолаев, А.М. Гребенников, И.Е. Тамаровский, А.А. Карпченко, Л.А. Алексеева, С.М. Бецукова, В.Ю. Плыкина, М.Д. Карпова, В.Н. Кривцова, М.А. Клюкина, В.Н. Щербакова, Ю.А. Смирнова, В.Н. Щербакова, Ю.А. Смирнова



# Аналитическое обеспечение мониторинга углерода в почвах



<sup>1</sup>Когут Б.М., <sup>2</sup>Милановский Е.Ю., <sup>1</sup>Хаматнуров Ш.А.

<sup>1</sup>Почвенный институт им. В. В. Докучаева

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических  
проблем почвоведения РАН

- ▶ При определении содержания почвенного органического углерода (ПОУ) используют прямые и косвенные методы анализа. К прямым методам относятся способы сухого и мокрого сжигания с последующей фиксацией количества выделившегося диоксида углерода (способ сухого сжигания по Густавсону и мокрого озоления по Кнопфу).
- ▶ Применение косвенных методов определения содержания ПОУ по Тюрину и Уолкли-Блэку основано на допущении, предложенным Ищерековым (1904) и детально разработанном Тюриным (1937).
- ▶ Согласно этому предложению значения содержания Сорг, определенные прямым методом сухого сжигания и мокрого озоления, и таковые, полученные косвенным методом по окисляемости, будут совпадать, если степень окисленности органического вещества равна 0.

Таблица 1. Результаты определения содержания органического углерода способом сухого сжигания на автоматических анализаторах, методами Тюрина и Уолкли-Блэка по окисляемости, степени внутримолекулярной окисленности ПОВ, а также неорганического углерода для различных почв

| Почва, образец                              | Мокрое озоление, по окисляемости, Сорг |                   | Сухое сжигание на анализаторах*) |                   | Степень окисленности |       | Источник   |
|---|--|-------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|-------|--|
|   | C <sub>1орг</sub>                      | C <sub>2орг</sub> | C неорг                          | C <sub>3орг</sub> | 1ω                   | 2ω    |  |
| Дерново-подзолистая СП-2                    | 0,42                                   |                   | нет                              | 0,57              | 26,3                 |       | “Аналитическое обеспечение..., 1993” Когут, Фрид, 1993 |
| Чернозем СП-1                               | 3,23                                   |                   | нет                              | 3,67              | 12,0                 |       |  |
| Краснозем СКР-3                             | 2,39                                   |                   | нет                              | 3,19              | 25,1                 |       |  |
| Чернозем карбонатный САЧкП-01               | 2,26                                   |                   | 0,09                             | 2,92              | 22,6                 |       |  |
| Светло-каштановая СП-3                      | 1,06                                   |                   | 0,34                             | 1,33              | 20,3                 |       |  |
| Серозем карбонатный ССК-3                   | 0,27                                   |                   | 2,32                             | 0,42              | 35,7                 |       |  |
| Феррасоль, см                               | 0-10                                   | 7,64              | нет                              | 22,9              | 22,9                 |       | Милановский, 2009                                      |
|   | 20-30                                  | 3,23              | нет                              | 28,5              | 28,5                 |       |  |
|   | 60-80                                  | 1,18              | нет                              | 38,9              | 38,9                 |       |  |
| Soil FS                                     | 1,48                                   |                   | нет                              | 2,10              | 29,5                 |       | Ciavatta et al., 1989                                  |
| Soil A                                      | 1,57                                   |                   | нет                              | 2,25              | 30,2                 |       |  |
| Eutric Albeluvisol 92 образца, 0 – 20 см    | 2,05                                   | 2,14              | нет                              | 1,94              | -5,7                 | -10,3 | Jankauskas et al., 2006                                |
| Brazilian savannah soils 54 образца, 0-20см |  | 1,64              | нет                              | 2,29              |                      | 28,4  | Sato et al., 2014                                      |

- ▶ Помимо степени окисленности ПОВ на надежность определения содержания Сорг по методам Тюрина и Уолкли-Блэка могут оказывать влияние и такие факторы, как температура и время мокрого озоления, наличие в почве хлоридов и закисных соединений железа и др.
- ▶ В начале прошлого века разработка альтернативного методам Кнопа-Сабанина и Густавсона и широкое распространение «приблизительного» (Schollenberger, 1927) метода определения Сорг по окисляемости было вызвано необходимостью обработки *«огромного количества собираемых при полевых исследованиях материалов, в целях общей и агрономической характеристики почв»* (Тюрин, 1931).

# *Автоматические анализаторы*

- ▶ Развитие аналитического приборостроения во второй половине 20 века привело к разработке автоматических анализаторов определения содержания С, базирующихся на принципе сухого сжигания, не уступающих и даже превосходящих по производительности косвенные методы анализа по Тюрину и Уолкли-Блэку. В 1970 г. Табатабаи и Бремнер (Tabatabai, Bremner, 1970) предложили использовать автоматический анализатор Лесо, сконструированный для определения содержания углерода в сталях и сплавах, для анализа почв на общее содержание углерода.

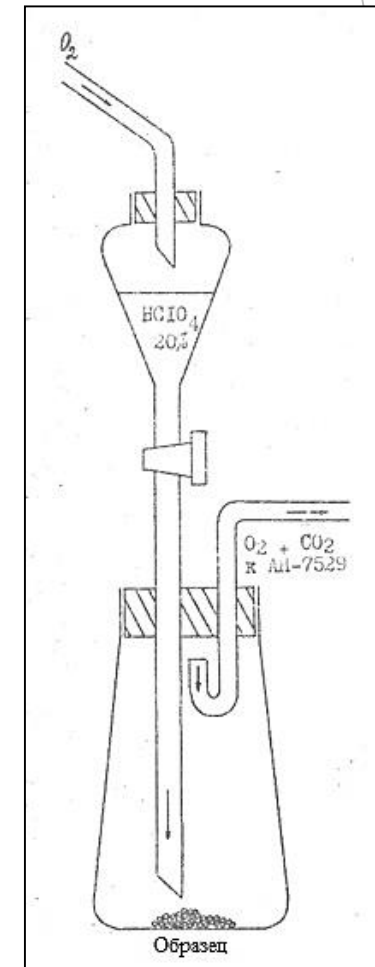
► В начале 80-х годов прошлого века в Почвенном институте им. Докучаева был испытан экспресс - анализатор АН-7529 (Гомель) (Кочетов с соавт., 1985). Разработана и аттестована методика определения содержания С в почвах на базе этого автоматического анализатора с использованием ГСО (“Аналитическое обеспечение..., 1993”).

► Стоимость АН-7529 была в 5-10 раз меньше зарубежных аналогов, а цена одного анализа на нем не менее чем в 10 раз ниже, чем выполняемых на зарубежных приборах.



# Определение $S_{неорг}$ и $S_{орг}$ в карбонатных почвах

Согласно методике в одной навеске почвы при ее сжигании (температура выше  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) определяют общий углерод. Другую навеску почвы помещают в специально сконструированную приставку к прибору и обрабатывают раствором  $\text{HClO}_4$ . Выделяющийся  $\text{CO}_2$  карбонатов почв, напрямую, минуя печь, поступает в поглотительный раствор и его определяют с помощью метода кулонометрического титрования. По разности между количеством общего и неорганического углерода вычисляют органический углерод почвы. Производительность отдельного определения содержания  $S_{неорг}$  и  $S_{орг}$  в карбонатных почвах на анализаторе АН-7529 составила до 50 образцов в рабочую смену.





# *Метрологическая характеристика методов анализа*

- ▶ Воспроизводимость и правильность являются основными показателями качества аналитической информации. Воспроизводимость относится к флуктуациям серии измерений случайной величины относительно центра распределения серии, правильность – к расхождению между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины. Надежным способом выявления и обеспечения правильности является создание стандартных образцов, аттестованных в межлабораторном эксперименте по составу и свойствам, и широкое использование их в аналитической практике в качестве калибровочных и контрольных (Большаков, 1992).

Таблица 2. Результаты определения содержания Сорг (% от массы почвы) методом Тюрина в различных модификациях во внутрилабораторном эксперименте (Орлов с соавт., 1996)

| Метод   | Чернозем<br>выщелоченный,<br>гор.А1 |           | Дерново-<br>подзолистая<br>почва, гор.А1 |           |
|---|-------------------------------------|-----------|--|-----------|
|   | n                                   | M±tm      | n  | M±tm      |
| Сухое сжигание (анализатор АН-7529)                                   | 4                                   | 5.43±0.01 | 4  | 2.36±0.00 |
| Метод Тюрина без катализатора   | 4                                   | 4.17±0.30 | 4  | 1.75±0.06 |
| Метод Тюрина с катализатором  | 4                                   | 4.93±0.10 | 4  | 2.14±0.06 |
| Метод Тюрина в модификации Никитина,<br>20 мин, 150°С                 | 4                                   | 3.78±0.03 | 4  | 1.63±0.01 |
| Метод Тюрина в модификации Никитина,<br>30 мин, 160°С                 | 4                                   | 4.23±0.08 | 4  | 1.86±0.03 |
| Метод Тюрина в модификации Никитина<br>с катализатором, 30 мин, 160°С | 4                                   | 4.69±0.02 | 4  | 1.99±0.05 |
| Метод Тюрина в модификации<br>Антоновой, Скалабана, Сучилкиной        | 4                                   | 3.71±0.15 | 4  | 1.55±0.02 |

Таблица 3. Результаты аттестации стандартных образцов СП1 и СП2 на содержание органического углерода способом сухого сжигания в различных организациях (“Аналитическое обеспечение...”, 1993)

| Тип анализатора       | Организация                            | Статистические параметры |      |      |     |
|-----------------------|--|--------------------------|------|------|-----|
|                       |  | M                        | S    | m    | S   |
| СП-1 Курский чернозем |  |                          |      |      |     |
| АН-7529               | Почвенный институт им. В. В. Докучаева | 3.54                     | 0.05 | 0.02 | 1.3 |
|                       | Геологический факультет МГУ            | 3.69                     | 0.05 | 0.02 | 1.3 |
|                       | ИГЕМ*                                  | 3.59                     | 0.03 | 0.01 | 0.9 |
| ВИУА-Хереус           | ПИСХ** Каунас                          | 3.72                     | 0.04 | 0.02 | 1.1 |
|                       | ПИСХ** Харьков                         | 3.99                     | 0.06 | 0.03 | 1.6 |
|                       | ПИСХ** Саратов                         | 3.80                     | 0.04 | 0.02 | 1.1 |
|                       | ВИУА***                                | 3.64                     | 0.05 | 0.02 | 1.5 |
| Леко                  | Почвенный институт им.В.В.Докучаева    | 3.47                     | 0.10 | 0.04 | 2.9 |
|                       | ВИУА***                                | 3.53                     | 0.02 | 0.01 | 0.6 |

Продолжение таблицы 3. Результаты аттестации стандартных образцов СП1 и СП2 на содержание органического углерода способом сухого сжигания в различных организациях (“Аналитическое обеспечение...”, 1993)

| Тип анализатора                           | Организация                            | Статистические параметры |      |       |      |
|---|--|--------------------------|------|-------|------|
|   |  | M                        | S    | m     | S    |
| СП-2 Московская дерново-подзолистая почва |  |                          |      |       |      |
| АН-7529                                   | Почвенный институт им. В. В. Докучаева | 0.49                     | 0.01 | 0.003 | 1.5  |
|   | Геологический факультет МГУ            | 0.60                     | 0.01 | 0.004 | 1.8  |
|   | ИГЕМ*                                  | 0.59                     | 0.01 | 0.01  | 2.4  |
| ВИУА-Хереус                               | ПИСХ** Каунас                          | 0.55                     | 0.02 | 0.01  | 3.3  |
|   | ПИСХ** Харьков                         | 0.61                     | 0.01 | 0.01  | 2.1  |
|   | ПИСХ** Саратов                         | 0.71                     | 0.02 | 0.01  | 3.0  |
|   | ВИУА***                                | 0.45                     | 0.05 | 0.02  | 11.4 |
| Леко                                      | Почвенный институт им.В.В.Докучаева    | 0.63                     | 0.03 | 0.01  | 5.4  |
|   | ВИУА***                                | 0.39                     | 0.02 | 0.01  | 5.6  |

- ▶ Согласно Д. С. Орлова с соавт. (1996): “*Все предложенные модификации метода Тюринга дают хорошую воспроизводимость результатов, ... но не обеспечивают достаточную (примечание авторов) **правильность результатов***” (табл. 2). Правильность метода сухого сжигания даже в межлабораторном эксперименте превосходит таковую метода Тюринга во внутрилабораторном (табл. 2 и 3).
- ▶ Разница между максимальным и минимальным значением среднего Сорг в черноземе при сухом сжигании составила **0.5 %** от массы почвы, а таковая по методу Тюринга **1.2 %**: для дерново-подзолистой почвы **0.3** и **0.6%** соответственно.

- ▶ Обоснованность преимущества прямого метода сухого сжигания на автоматических анализаторах по сравнению с косвенным методом Тюрина по окисляемости для определения содержания ПОУ, как с теоретических, так и с метрологических позиций не вызывает сомнений. Рекомендовано при мониторинге содержания и запасов органического углерода в почвах использовать метод сухого сжигания на автоматических анализаторах.



Государственные стандартные образцы СП-1 (Курский чернозем) и СП-2 (Московская дерново-подзолистая почва)



Анализатор углерода Метавак CS-30

Метрологические характеристики содержания органического углерода в государственных стандартных образцах (ГСО) почвенных масс

| Наименование образца | Аттестованные значения ГСО – массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность аттестованного значения ГСО при P=0,95% |
|----------------------|--|--|
| СП-1, ООКО152        | 3,6  | 0,2  |
| СП-2, ООКО153        | 0,55   | 0,07   |

Содержание органического углерода в ГСО почвенных масс, определенные на анализаторе углерода Метавак CS-30

| Наименование образца | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность измеренного значения, при P=0,95% |
|----------------------|-----------------------------|--|
| СП-1, ООКО152        | 3,665                       | 0,015  |
| СП-2, ООКО153        | 0,565                       | 0,006  |

## *Пробоподготовка*

- ▶ Проведено испытание нескольких способов пробоподготовки почв: способ, ранее использованный в лаборатории биологии и биохимии почв Почвенного института им. Докучаева, методики ГОСТ 26213-2021 и ГОСТ ISO 11464-2015 и способ, описанный в MRV (FAO, 2019) протоколе. В оптимальном варианте пробоподготовки почв (следующий слайд), апробированном на образцах чернозема и дерново-подзолистых почв, заимствованы принципы из разных способов. Этот способ характеризуется хорошей воспроизводимостью результатов анализа на содержание Сорг. Время пробоподготовки 1 образца почв – 10 ÷ 15 мин.



# *Пропись оптимального варианта пробоподготовки почвы*

- ▶ Тщательно перемешивают всю массу образца почвы, аккуратно раздавливают резиновым пестиком комки, и распределяют ее тонким слоем на поддоне, который не будет влиять на состав анализируемой почвы. Весь почвенный материал пропускают через сито 2 мм. Просеянную почвенную массу делят на 4 примерно равные части. Из каждой части отбирают пробы. Повторяют циклично данную процедуру до получения требуемого количества почвы: сначала до массы 100 г, затем до массы 20 г, и далее до окончательной пробы - 6 г. Затем из пропущенной через сито пробы удаляют пинцетом видимые невооруженным глазом органические остатки (неразложившиеся корни, растительные остатки и т.п.), растирают почву и пропускают через сито 0.25 мм.
- ▶ Jackson (1968) Представительная проба, сито 2 мм, **> 5.3 г**

# *Аналитическое обеспечение мониторинга С в почвах*

- ▶ Унифицированная методика пробоподготовки почв на определение С
- ▶ Аттестованная методика определения содержания общего и неорганического углерода на автоматических анализаторах
- ▶ Комплект государственных стандартных образцов почвенных масс, аттестованных на содержание общего и неорганического углерода



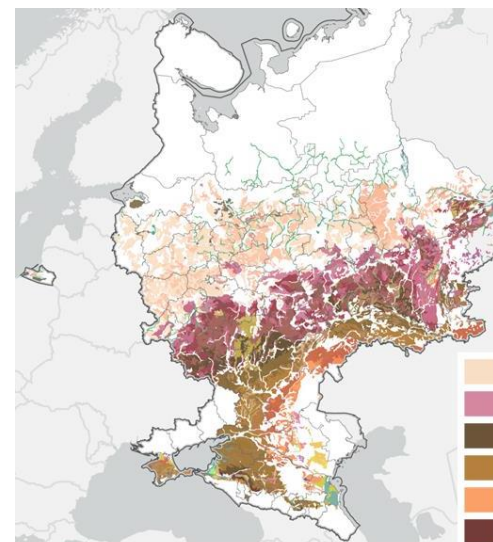


## Направление 2. Создание признанных на международном уровне методов интеграции данных наземных измерений, дистанционного зондирования и математического моделирования для оценки пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах России

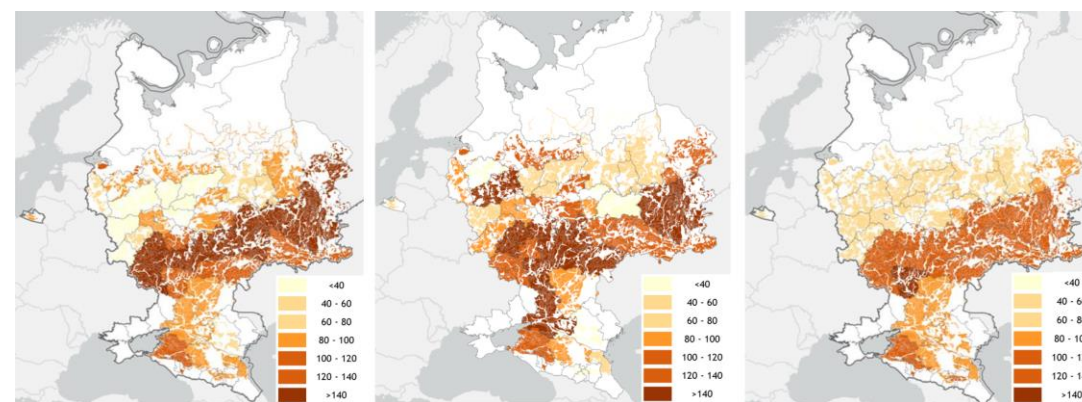
- По методике МГЭИК, рекомендованной для национального учета парниковых газов, выполнена оценка запасов и бюджета углерода в почвах агроэкосистем при разных режимах землепользования Европейской территории Российской Федерации.
- В качестве основы национального обобщения использована ГИС платформа «Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ», включающая 54695 картографических единиц и 10107 типологических единиц качества почв (ТЕКП).
- Удельная концентрация углерода в разностях почв ТЕКП определялась на основе данных справочника Физико-химических свойств почв сельскохозяйственного назначения и площадей сельскохозяйственных угодий данных статистического учета муниципальных образований РФ.
- Сформирована первая версия базы данных средних концентраций углерода в слое почв 0-30 см сельскохозяйственных угодий ЕТР для различных почвенно-климатических условий. Полнота и детальность цифровой карты соответствует географическому масштабу 1:300 000 – 1:500 000, что позволяет проецировать ТЕКП с достаточной детальностью на субъекты РФ.

### Значимость результата

Основа для оценки вклада вида использования земель сельскохозяйственного назначения РФ для Национального кадастра антропогенных выбросов (сектор «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство»)



Слой «почвы» ГИС  
«Почвенные ресурсы  
сельскохозяйственных  
угодий РФ»



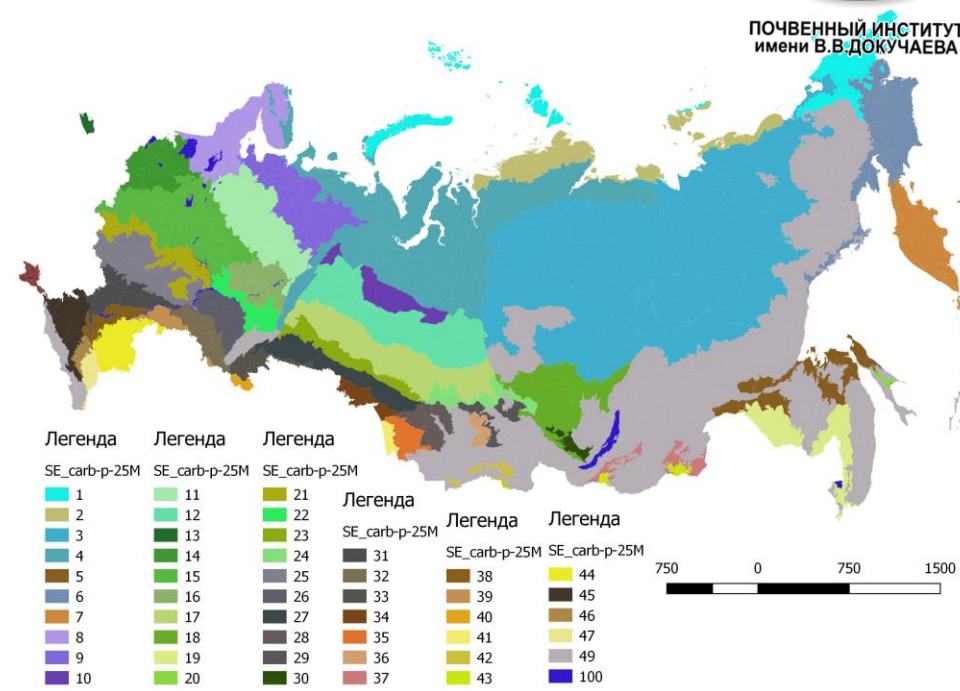
Концентрация органического углерода (тС/га) в почвах категорий землепользования Европейской территории Российской Федерации: пашни (слева), пастбищ (в центре) и сенокосов (справа)

# Направление 1. Создание сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах России на основе стандартизированной инфраструктуры мирового уровня



ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ В.В.ДОКУЧАЕВА

Схема оптимального размещения наблюдательной сети наземного мониторинга для достоверной оценки запасов и бюджета углерода в агроэкосистемах Российской Федерации при различных режимах сельскохозяйственного землепользования



- На базе Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации М 1:2 500 000 (2013)
- 49 почвенно-экологических провинций, отражающие сочетания климатических поясов МГЭИК и почвенного покрова РФ как основа возможного размещения сети репрезентативных полигонов федерального уровня сети наземного мониторинга для достоверной оценки запасов и бюджета углерода в агроэкосистемах;
- 293 равнинных и 159 горных округов почвенно-экологического районирования как основа для размещения наблюдательной сети регионального уровня

## Значимость результата

Служит обоснованием репрезентативности сети наземного мониторинга федерального и регионального уровней

| №  | Климатическая зона IPCC | Регионы РФ  | Индекс провинции | Основные типы почв   | Группы почв WRB   |
|----|-------------------------|---|------------------|--|---|
| 25 | Умеренно холодная сухая | Белгородская, Курская, север Воронежской, юг Тульской, Липецкая, Тамбовская, Пензенская, Ульяновская обл. | М1               | Черноземы оподзоленные, выщелоченные и типичные мощные и среднемощные, мало- и среднегумусные и серые лесные почвы | Luvic Greyzemic Chernic Phaeozem s, Luvic and Haplic Chernozems |



## Направление 2. Создание признанных на международном уровне методов интеграции данных наземных измерений, дистанционного зондирования и математического моделирования для оценки пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах России

- Разработана методика определения содержания органического углерода в некарбонатных почвах на отечественном анализаторе углерода в сталях и сплавах Метавак CS-30 (г. Ижевск). Подобраны режимы сжигания почвенных проб для определения содержания Сорг (1000°C), время сжигания 3-5 мин, масса оптимальной навески – 500 мг.
- Проведена калибровка анализатора с помощью трех государственных стандартных образцов почвенных масс, созданных и аттестованных в Почвенном институте им. В.В. Докучаева на содержание общего, органического и неорганического углерода.
- Проведено сопоставление 4 способов пробоподготовки почв для анализа на содержание Сорг. Подобрана масса представительной пробы (6 г) для анализов. Выбран оптимальный режим пробоподготовки образцов почв для определения в них содержания Сорг.
- Метавак CS-30 обеспечивает на порядок более низкую стоимость анализов массовых проб почв на углерод по сравнению с зарубежными аналогами

### Значимость результата

Инновационная методика служит метрологическому обеспечению наблюдательной сети наземного учета и мониторинга параметров бюджета углерода в сельскохозяйственных экосистемах России

