



Спутниковый мониторинг углерода наземных экосистем России и ИАС «Углерод-Э»: возможности и перспективы развития

Барталев С.А., Лупян Е.А.

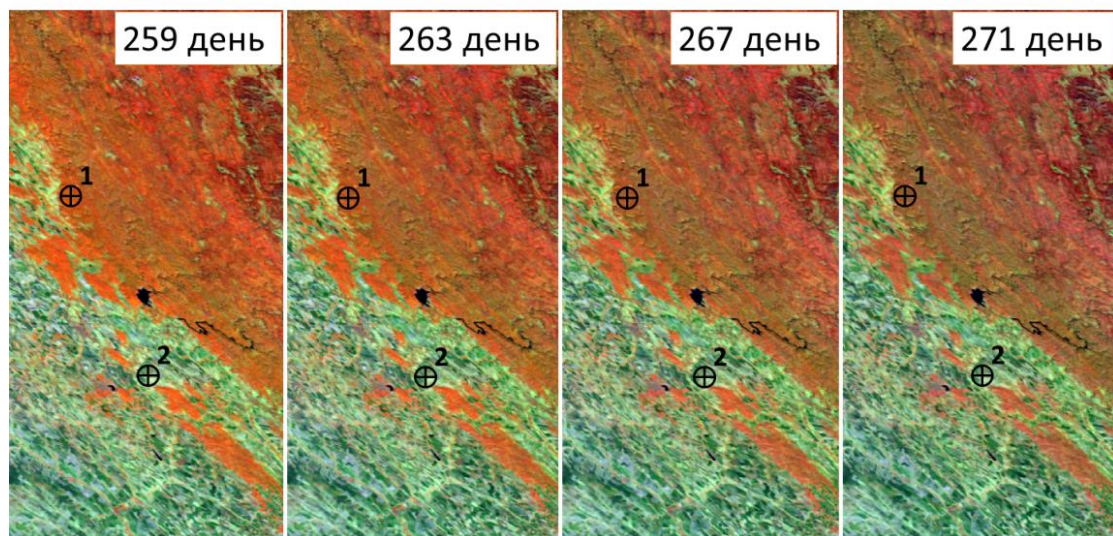
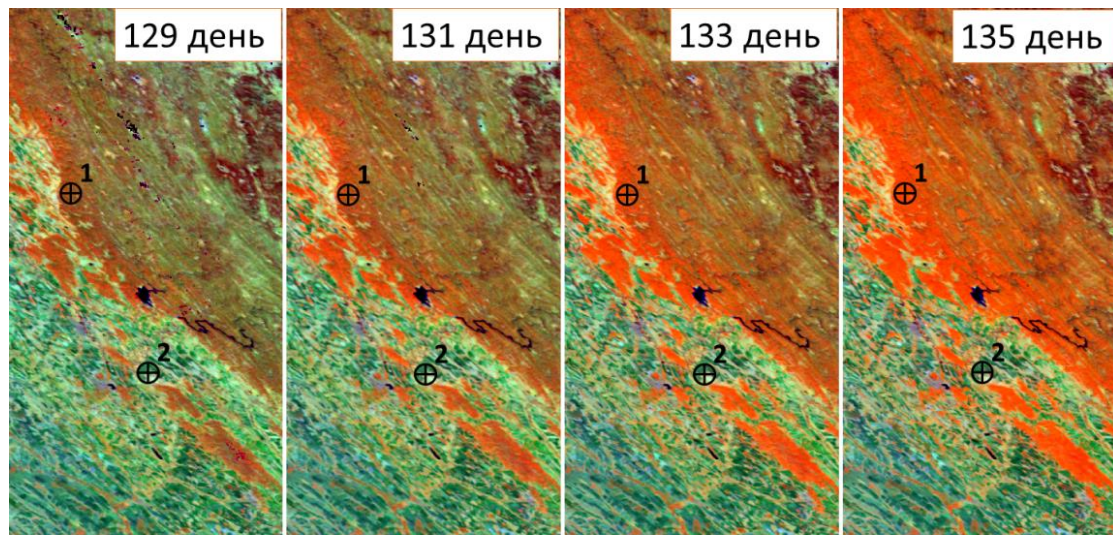
Институт космических исследований РАН

Конференция «Углерод в наземных экосистемах: мониторинг». Реализация ВИПГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»
15-16 февраля 2023 года, г. Москва

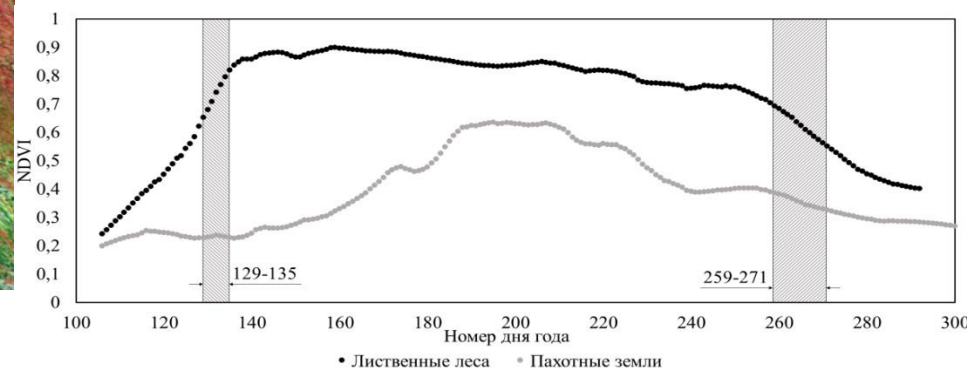
Вступительные замечания

- 1) Современные возможности оценки и мониторинга бюджета углерода различных типов наземных экосистем России характеризуются **острым недостатком информации** о их пространственном распределении и занимаемой площади, характеристиках растительного и почвенного покровов, а также динамики их состояния под воздействием различного рода природных и антропогенных факторов;
- 2) Спутниковые методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) не имеют реальной альтернативы для мониторинга состояния наземных экосистем России, обеспечивая **беспрецедентную полноту охвата (вся страна) и регулярность (ежегодно) получения информации**;
- 3) **Разработка методов дистанционного мониторинга углерода наземных экосистем** на основе автоматизированной комплексной обработки спутниковых данных ДЗЗ, информации выборочных наземных наблюдений на репрезентативной сети тестовых полигонов и математико-экологических моделей **относится к числу ключевых задач Проекта «РИТМ Углерода».**

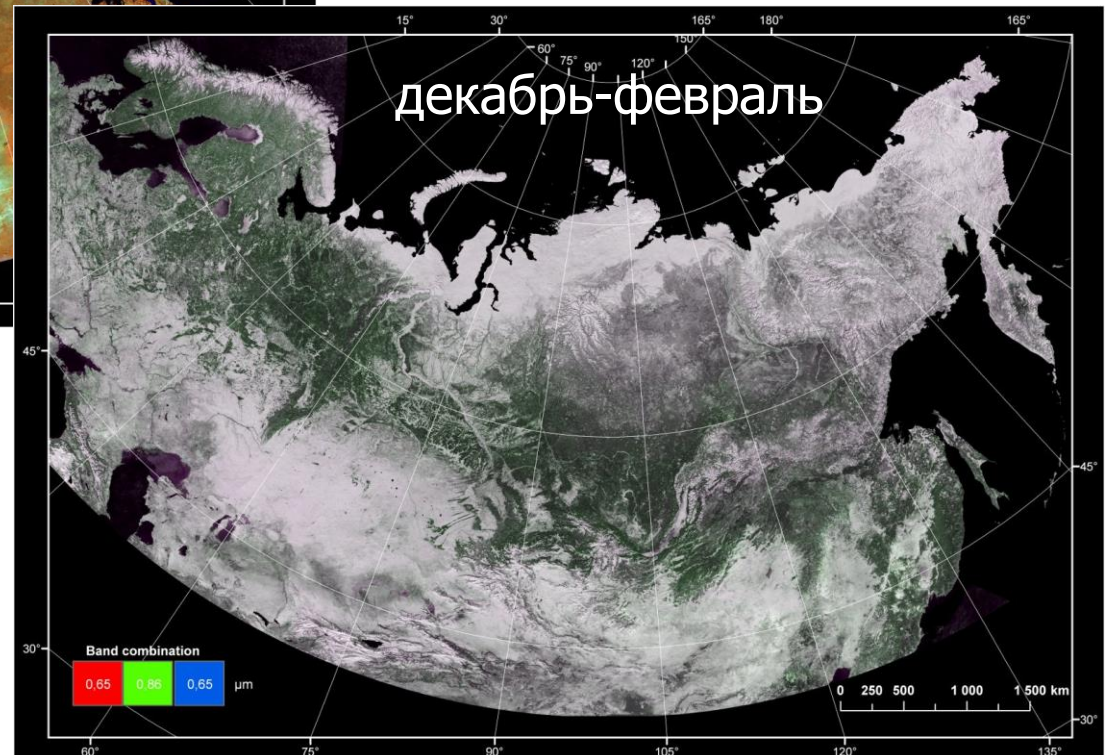
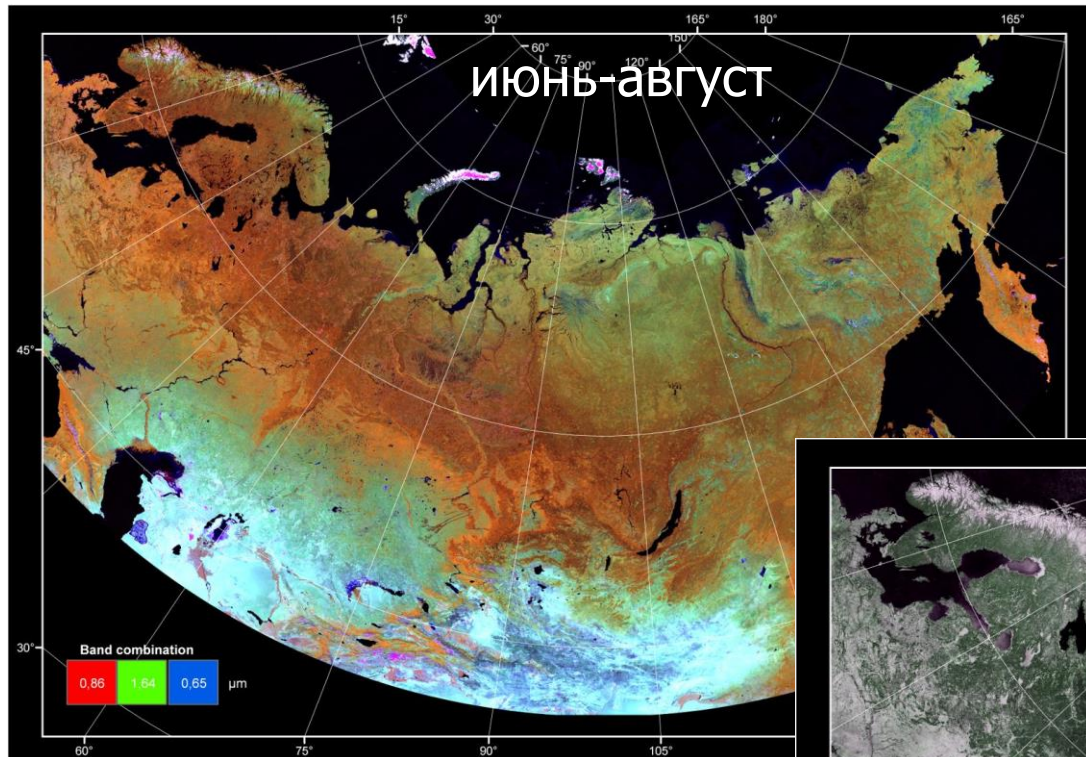
Требования к спутниковым данным ДЗЗ для мониторинга наземных экосистем



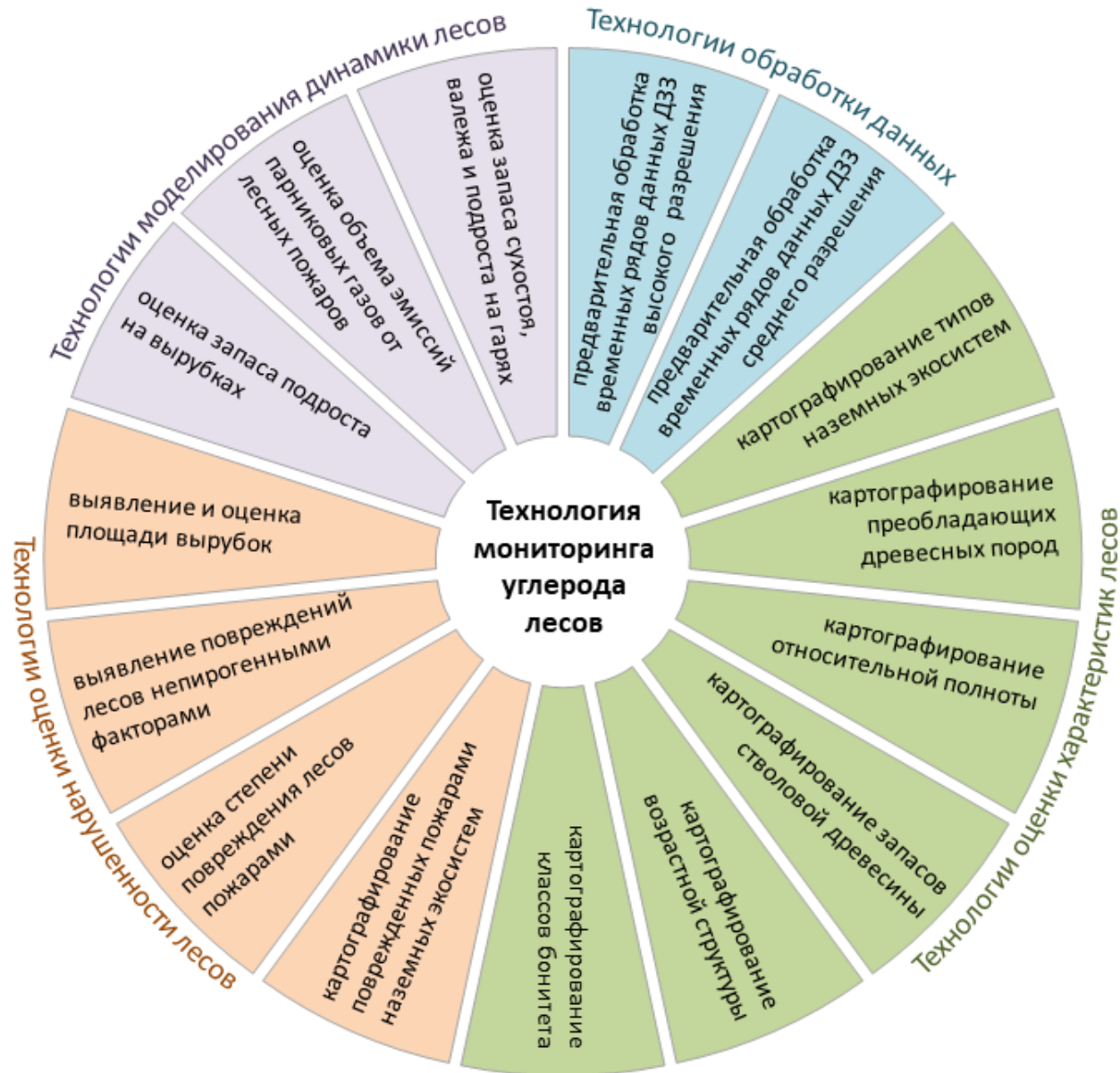
- однородные многолетние **ряды данных ДЗЗ высокого временного разрешения** (не реже чем 1 раз в 3-5 дней, предпочтительно ежедневно)
- данные измерений отражения земной поверхности **в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра**
- «штатная» предварительная обработка данных ДЗЗ, включая **радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию**
- глубокая очистка данных от влияния облаков и других мешающих факторов, **реконструкция непрерывных временных рядов**



Примеры разносезонных композитных спутниковых изображений



Структура комплекса технологий спутникового мониторинга углерода лесов России



ТИПЫ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ЛЕСА:

- Темнохвойные вечнозеленые
- Светлохвойные вечнозеленые
- Лиственные
- Смешанные с преобладанием хвойных
- Смешанные
- Смешанные с преобладанием лиственных
- Хвойные листопадные (лиственничные)
- Редины хвойные листопадные

ТРАВЯНО-КУСТАРНИКОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ:

- Луга
 - Степи
 - Хвойные вечнозеленые кустарники
 - Лиственные кустарники
- ВОДНО-БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ:**
- Болота
 - Прибрежная растительность

ТУНДРА:

- Кустарничковая
 - Осоковая
 - Кустарниковая
- ПРОЧАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ:**
- Гари
 - Пахотные земли

НЕ ПОКРЫТЫЕ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЗЕМЛИ:

- Открытые грунты и выходы горных пород
- Водные объекты
- Урбанизированные территории
- Вечные снега и льды

Коническая равноугольная проекция Альберса

Основные задачи дальнейшего развития



Повышение тематической детальности классификации и картографирования следующих типов наземных экосистем для решения задач мониторинга их бюджета углерода:

- 1) Болота
- 2) Водно-болотные угодья
- 3) Луговая растительность, в том числе с выделением пастбищ и сенокосов
- 4) Сухие степи, в том числе, с выделением пастбищ
- 5) Тундра, в том числе, с выделением оленьих пастбищ

Для дальнейшего развития технологии картографирования типов наземных экосистем необходимо согласование требований к тематическим легендам с Рабочими/Экспертными группами Проекта и организация сбора опорных данных на сети тестовых полигонов.

Концепция дистанционного мониторинга лесов

Данные выборочного наземного мониторинга, включая:

- Данные сети тестовых полигонов;
- Данные сети постоянных пробных площадей ГИЛ;
- Данные существующей сети научных пробных площадей;
- Данные измерения потоков углерода на эколого-климатических станциях;

- Таксация лесов на ПП
- Лесопатологические ПП
- Научные сети ПП

Наземные данные

Ежегодные карты:

- Категории земель
- Породы
- Запас
- Сомкнутость

- Полнота

- Средняя высота

- Бонитет

- Возраст

- Повреждения лесов

Данные ДЗЗ

Характеристики лесов

Модели

- Динамика роста
- Аллометрические уравнения

Методы ДЗЗ дают возможность получения информации о:

- Площади различных классов покрытых и непокрытых лесом земель;
- запасах, породно-возрастной структуре, бонитете и других характеристиках лесов;
- воздействию на леса деструктивных факторов (пожары, усыхания).

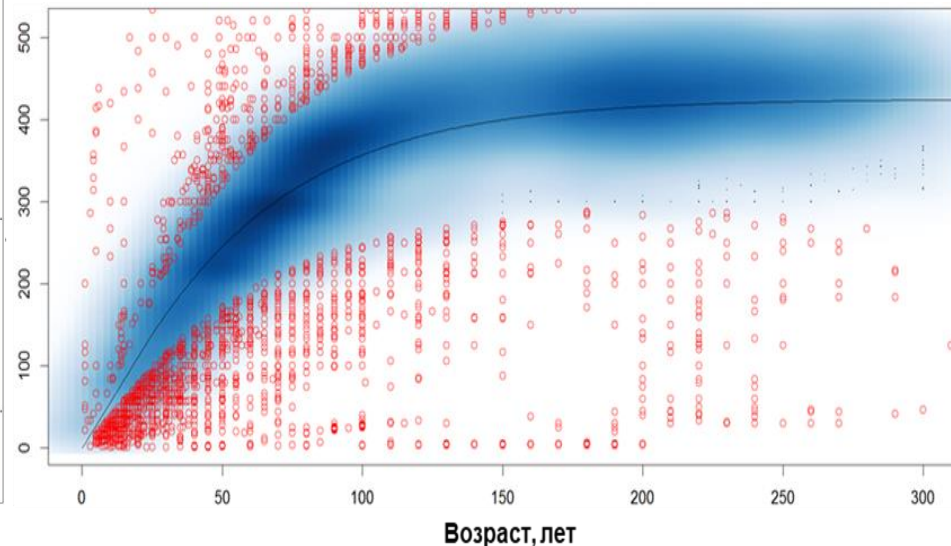
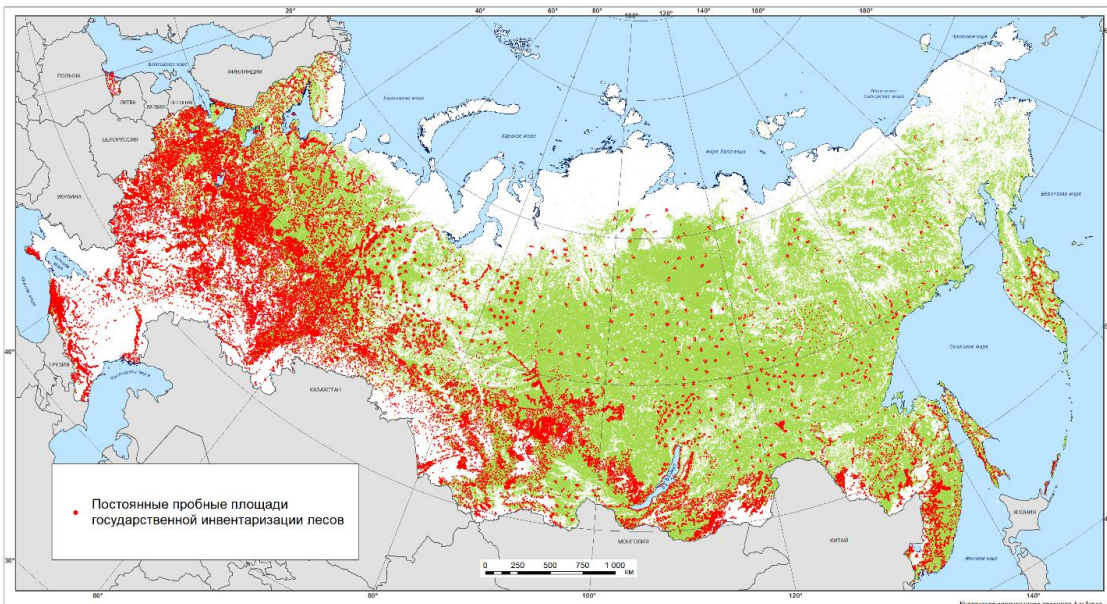


- Модели хода роста лесов;
- Модели взаимосвязи между характеристиками лесов;
- Модели мортмассы, живого напочвенного покрова и др.

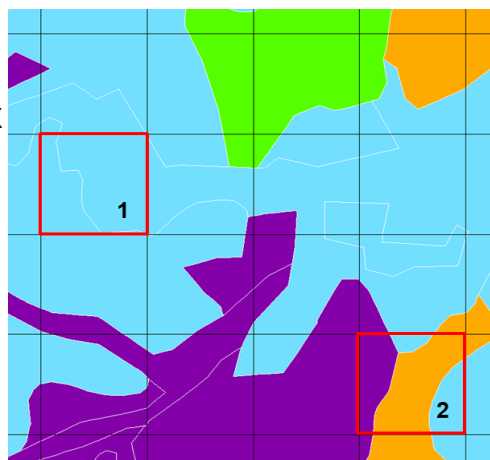
Концепция дистанционного мониторинга бюджета углерода лесов



Подготовка опорных данных для обучения алгоритмов и верификации результатов



Оценка площади лесов различных преобладающих пород для участков, соответствующих пикселям данных ДЗЗ на основе материалов АЦО ГИЛ (черным обозначены границы пикселей, белым – границы выделов)


















- Сосна
 - Ель
 - Береза
 - Осина
- Пиксель 1:
- 100% береза
- Пиксель 2:
- 20% береза
- 25% ель
- 55% сосна

Пример фильтрации данных АЦО ГИЛ на уровне выделов для насаждений лиственницы 2 класса бонитета. Синее облако точек – повыдельные данные, черная кривая – модель хода роста, красные точки – отфильтрованные выделы

ПРЕОБЛАДАЮЩИЕ ПОРОДЫ ЛЕСОВ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	Сосна		Дуб		Липа
	Ель		Бук		Клен
	Пихта		Береза каменная		Редкая лиственница
	Лиственница		Береза		Кедровый стланик
	Сибирский кедр		Осина		Лиственные кустарники

Основные задачи дальнейшего развития



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Сосна	Дуб	Липа
Ель	Бук	Клен
Пихта	Береза каменная	Редкая лиственница
Лиственница	Береза	Кедровый стланик
Сибирский кедр	Осина	Лиственные кустарники

Повышение тематической детальности классификации древесных пород леса с включением следующих дополнительных классов:

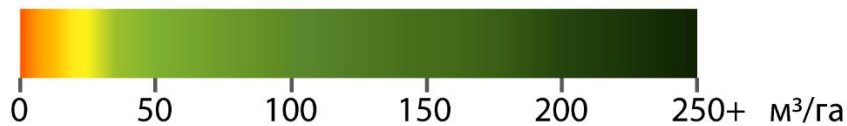
- 1) Ольха серая
- 2) Ольха черная
- 3) Ясень
- 4) Вяз
- 5) Граб
- 6) Тополь
- 7) Ива и др.

Для развития технологии картографирования преобладающих пород леса необходимо использование спутниковых данных ДЗЗ максимально возможно высокого временного разрешения и формирование репрезентативной опорной выборки на основе комплексного использования данных наземных обследований на пробных площадях и тестовых полигонах, лесоустроительной информации.

ЗАПАС СЫРОРАСТУЩЕЙ ДРЕВЕСИНЫ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Основные задачи дальнейшего развития



Повышение точности дистанционной оценки запасов стволовой древесины может быть достигнуто за счет:

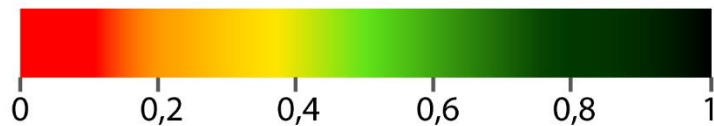
- 1) Разработки метода построения «приведенных» к низким углам Солнца композитных изображений с наличием снега на земной поверхности
- 2) Использования в качестве дополнительного предиктора данных спутниковых измерений индекса листовой поверхности леса (LAI) на бесснежных территориях

Необходима детальная верификация результатов спутниковой оценки запасов стволовой древесины на различных уровнях пространственной агрегации (от пиксела до уровня субъекта РФ) с использованием опорных данных, получаемых на основе наземных обследований пробных площадей и тестовых полигонов.

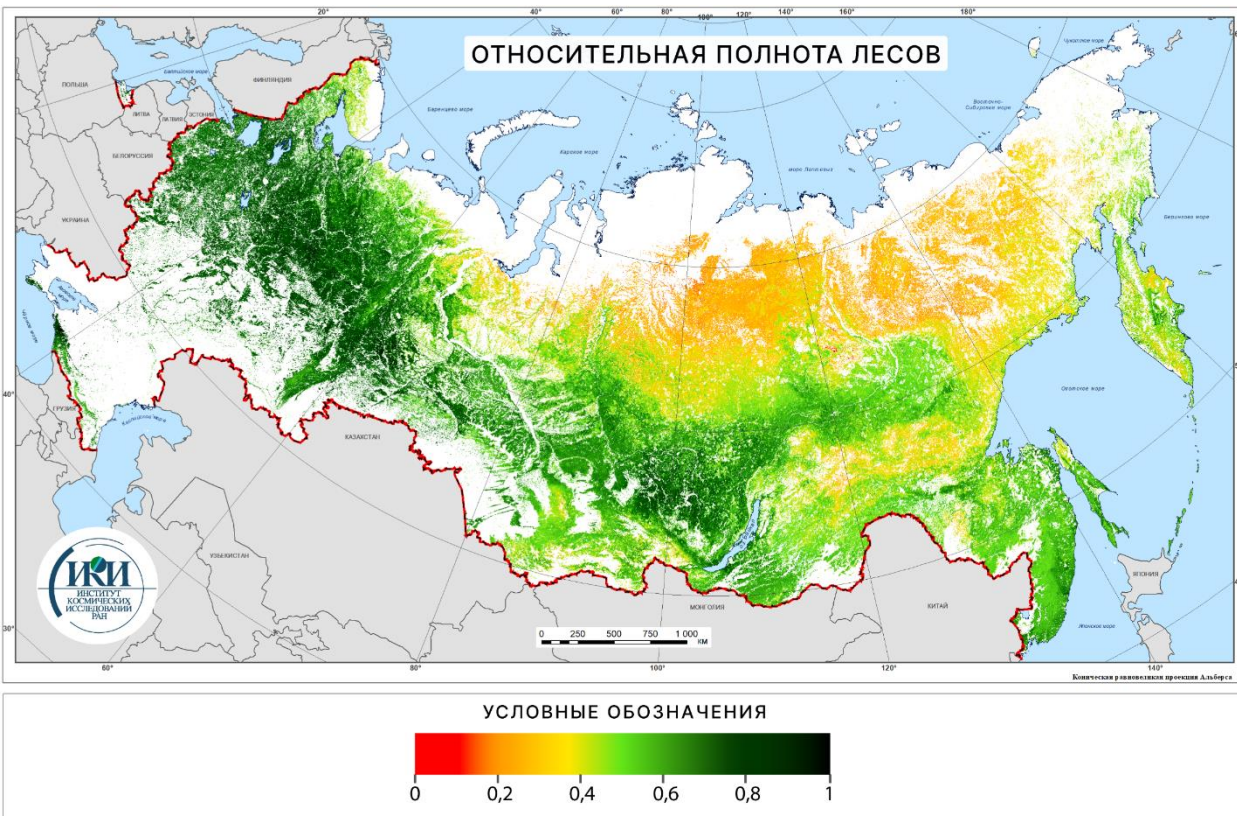
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОЛНОТА ЛЕСОВ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Основные задачи дальнейшего развития



Повышение точности дистанционной оценки полноты лесов потенциально может быть достигнуто за счет:

- 1) Формирование обучающей выборки в непрерывной шкале
- 2) Разработка метода построения «приведенных» к высоким углам Солнца композитных изображений с наличием снега на земной поверхности
- 3) Использование нормализованных композитных изображений летнего периода

Необходима детальная верификация результатов спутниковой оценки относительной полноты лесов с использованием опорных данных, получаемых на основе наземных обследований тестовых полигонов и материалов по выдельной таксации.

КЛАССЫ БОНИТЕТА ЛЕСОВ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ia, Ib

II

IV

Va

I

III

V

Vb

Основные задачи дальнейшего развития



Точность дистанционной оценки полноты лесов зависит от точности следующих информационных продуктов:

- 1) Временной ряд карт запасов сырорастающей стволовой древесины в лесах
- 2) Временной ряд карт преобладающих древесных пород лесов

Необходима детальная верификация результатов спутниковой оценки классов бонитета лесов с использованием опорных данных, получаемых на основе наземных обследований тестовых полигонов и материалов по выдельной таксации.

КЛАССЫ ВОЗРАСТА ЛЕСОВ



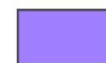
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Молодняки I класса



Средневозрастные



Спелые



Молодняки II класса



Приспевающие



Перестойные

Основные задачи дальнейшего развития

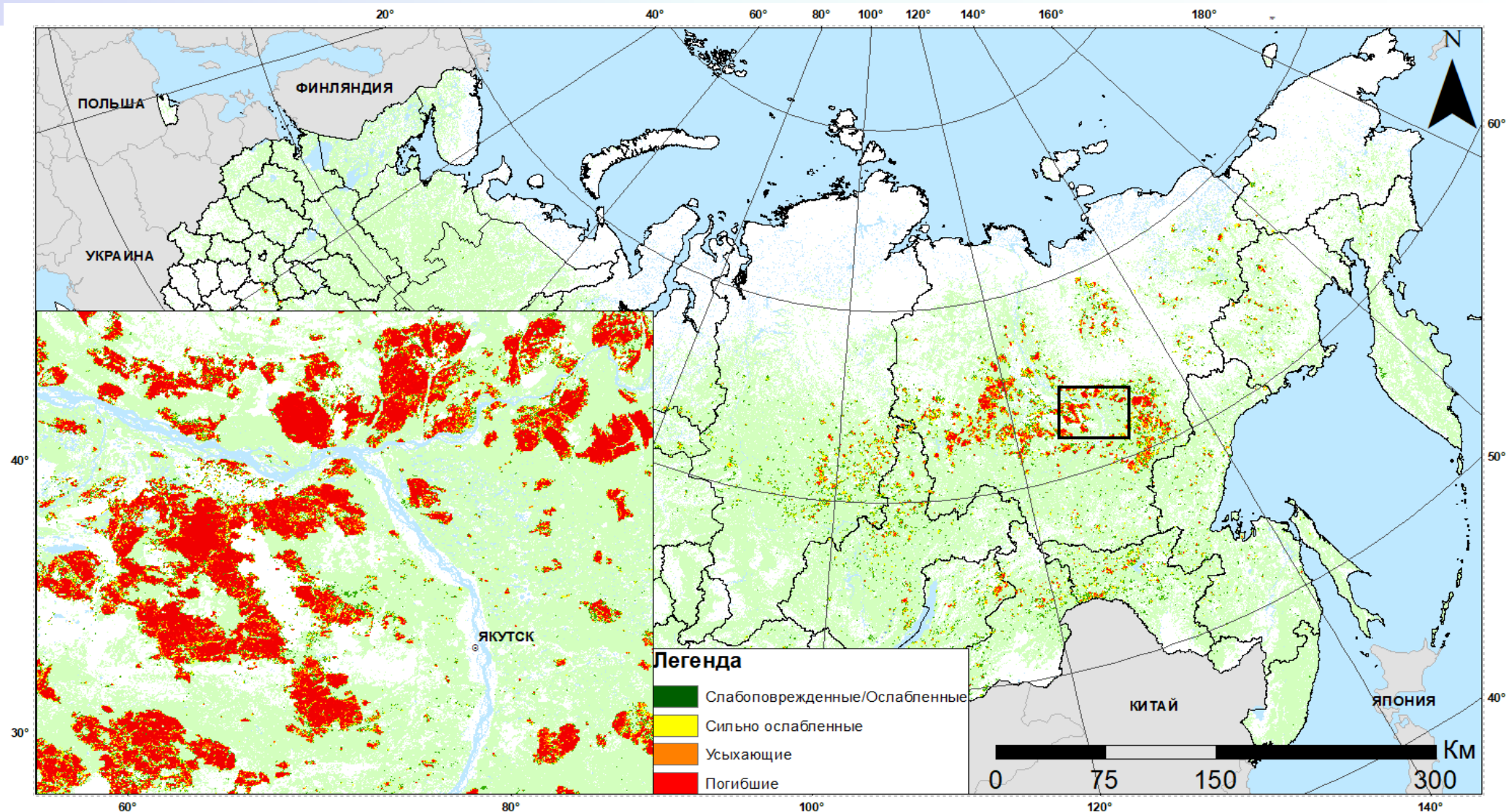


Повышение точности дистанционной оценки возраста лесов потенциально может быть достигнуто за счет:

- 1) Повышения точности дистанционной оценки запасов древесины в лесах
- 2) Улучшения моделей хода роста лесов, в том числе, полученных на основе данных сети пробных площадей ГИЛ

Необходима детальная верификация результатов спутниковой оценки возраста лесов с использованием опорных данных, получаемых на основе наземных обследований тестовых полигонов и актуальных материалов по выдельной таксации.

Спутниковая оценка гибели лесов от пожаров



Совокупная площадь погибших от пожаров лесов России в 2006-2022 годах составила около 31,5 млн.га

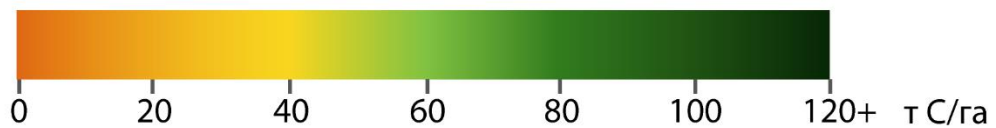
Площадь погибших от пожаров лесов России по данным ДЗЗ



ЗАПАС УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ РОССИИ



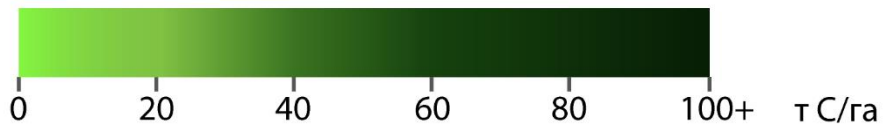
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



ЗАПАС УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ



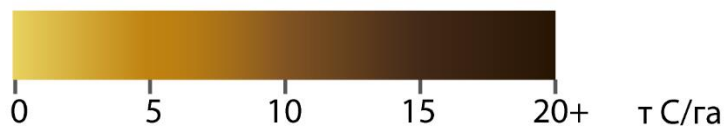
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



ЗАПАС УГЛЕРОДА В МОРТМАССЕ ЛЕСОВ



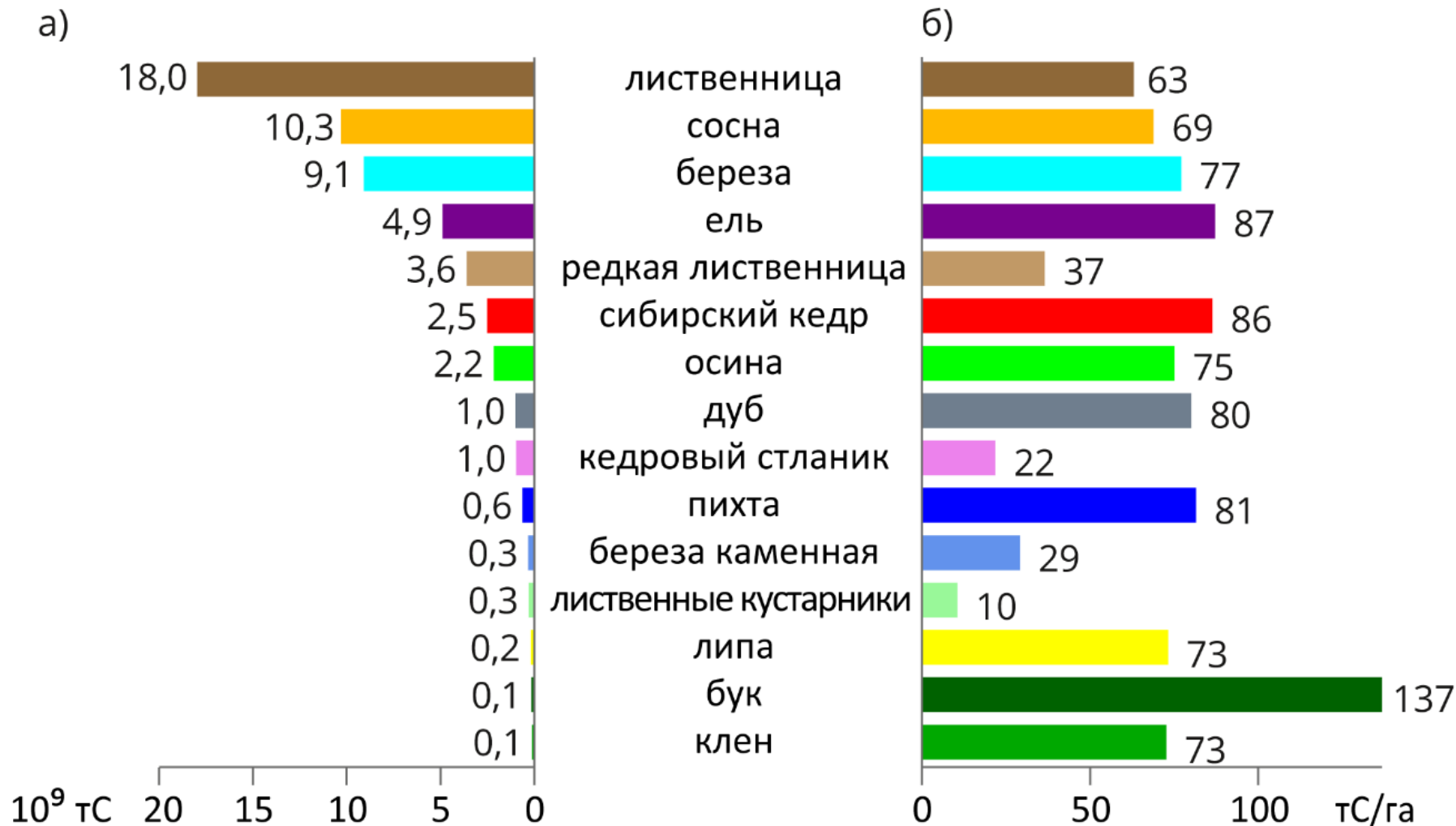
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



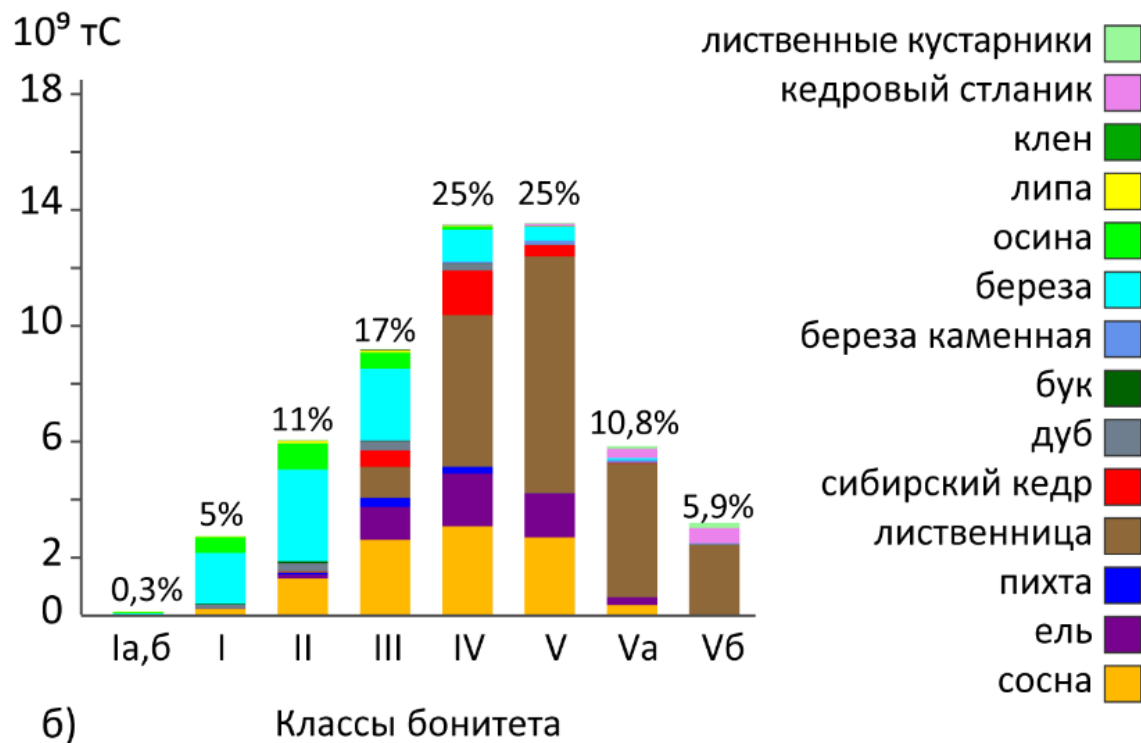
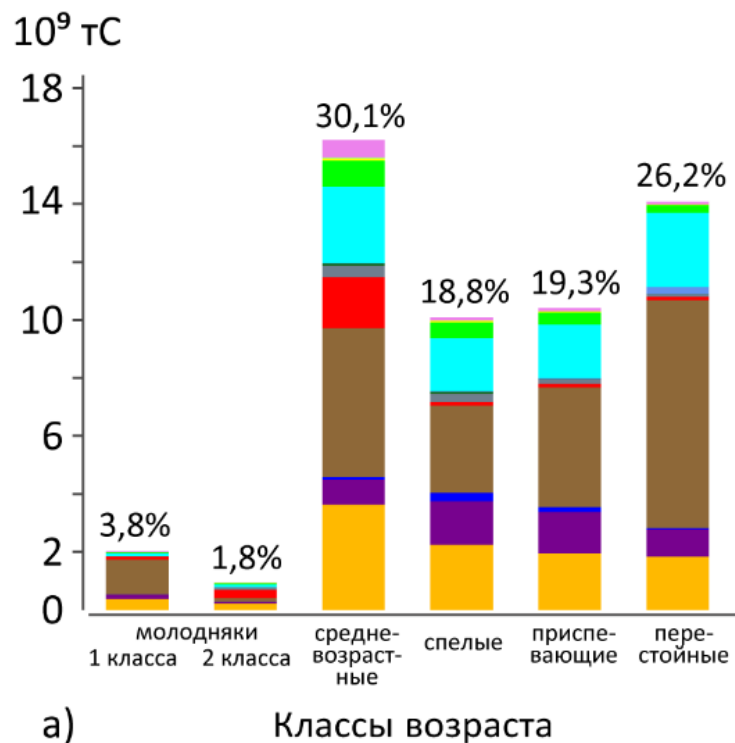
Запасы углерода в растительной биомассе лесов России



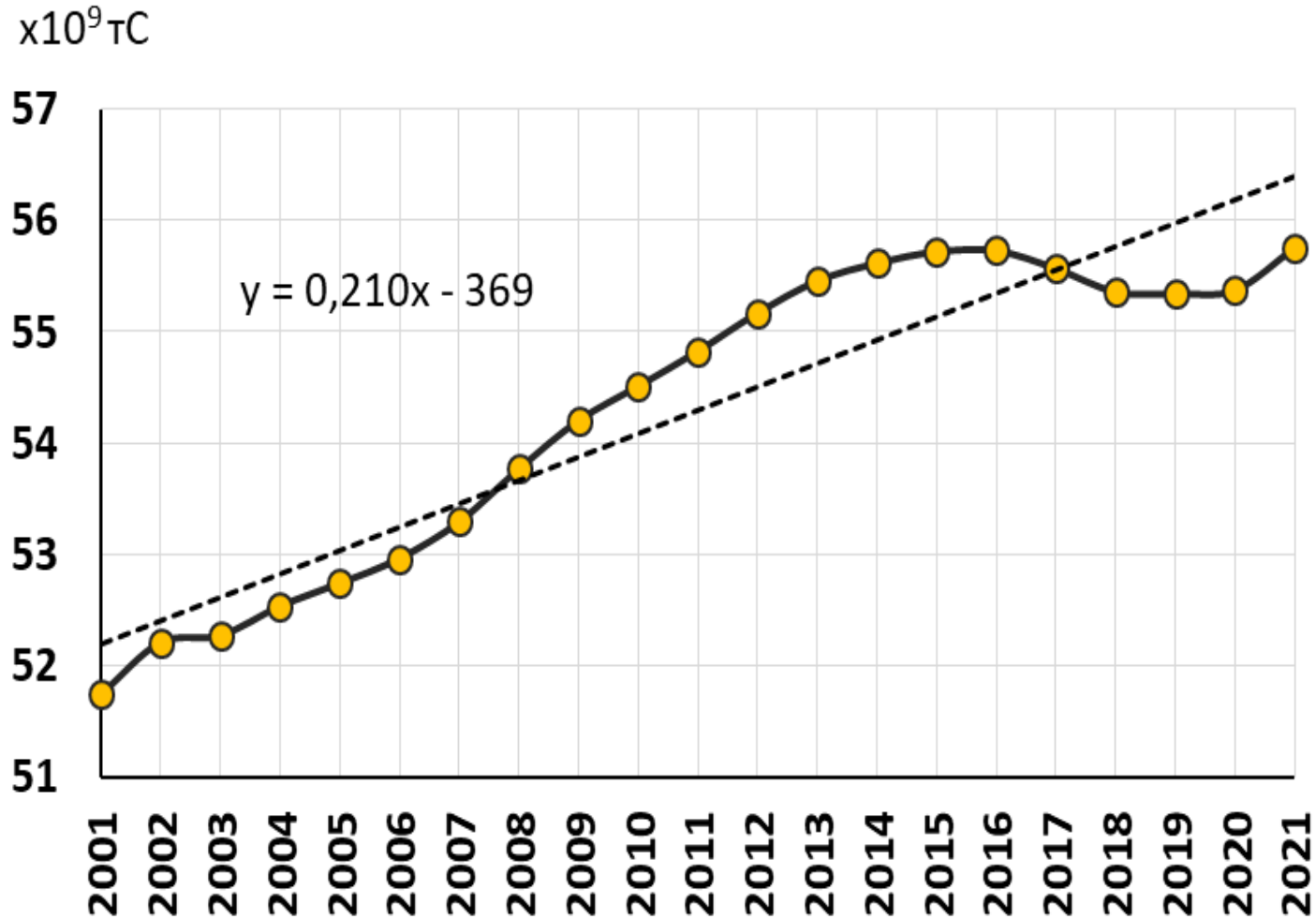
Запасы углерода в лесах различных преобладающих пород на 2021 год



Запасы углерода лесов различных преобладающих пород по классам возраста и бонитета на 2021 год



Динамика запасов углерода в растительной биомассе лесов России



ИЗМЕНЕНИЕ ЗАПАСА УГЛЕРОДА

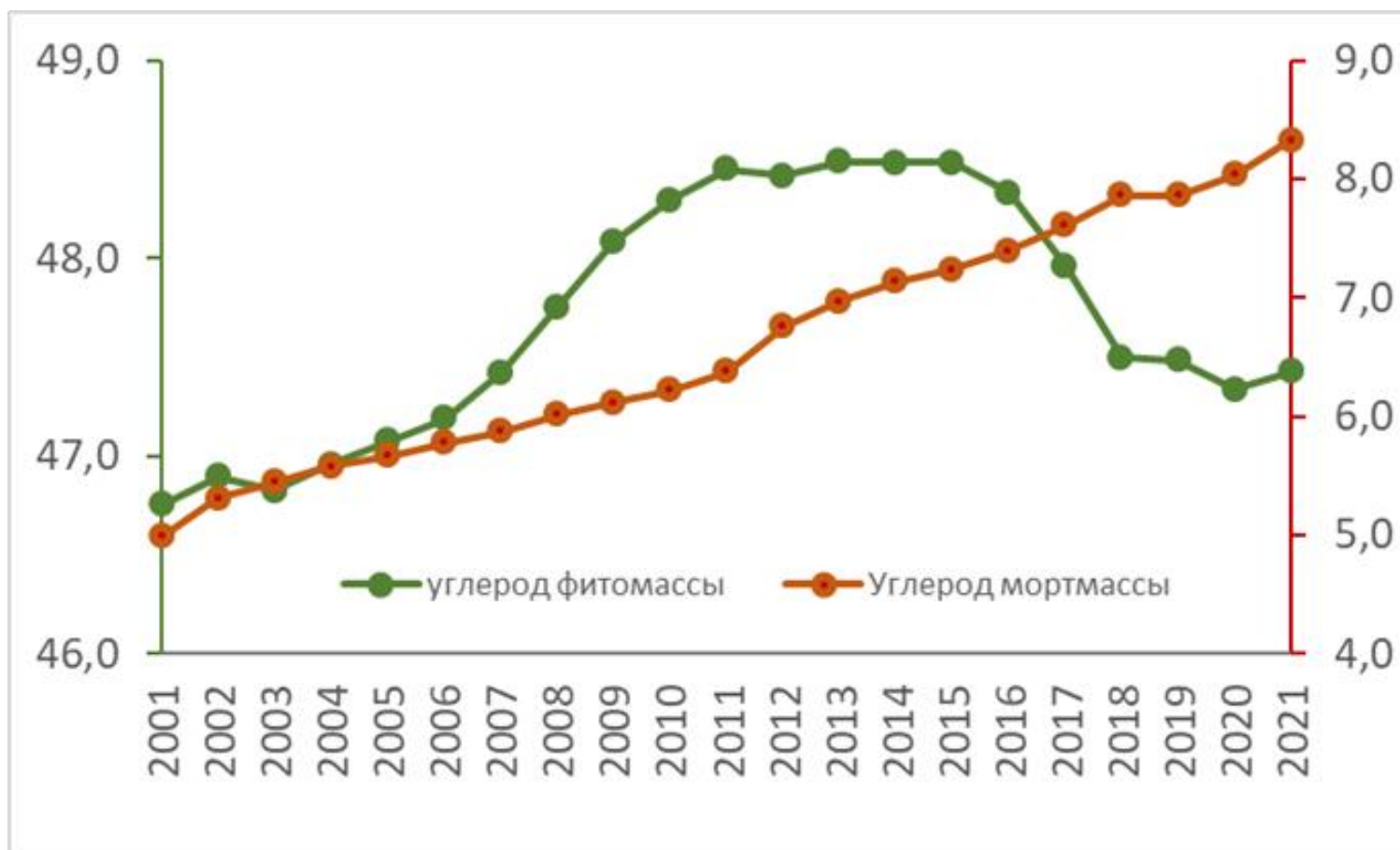


УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

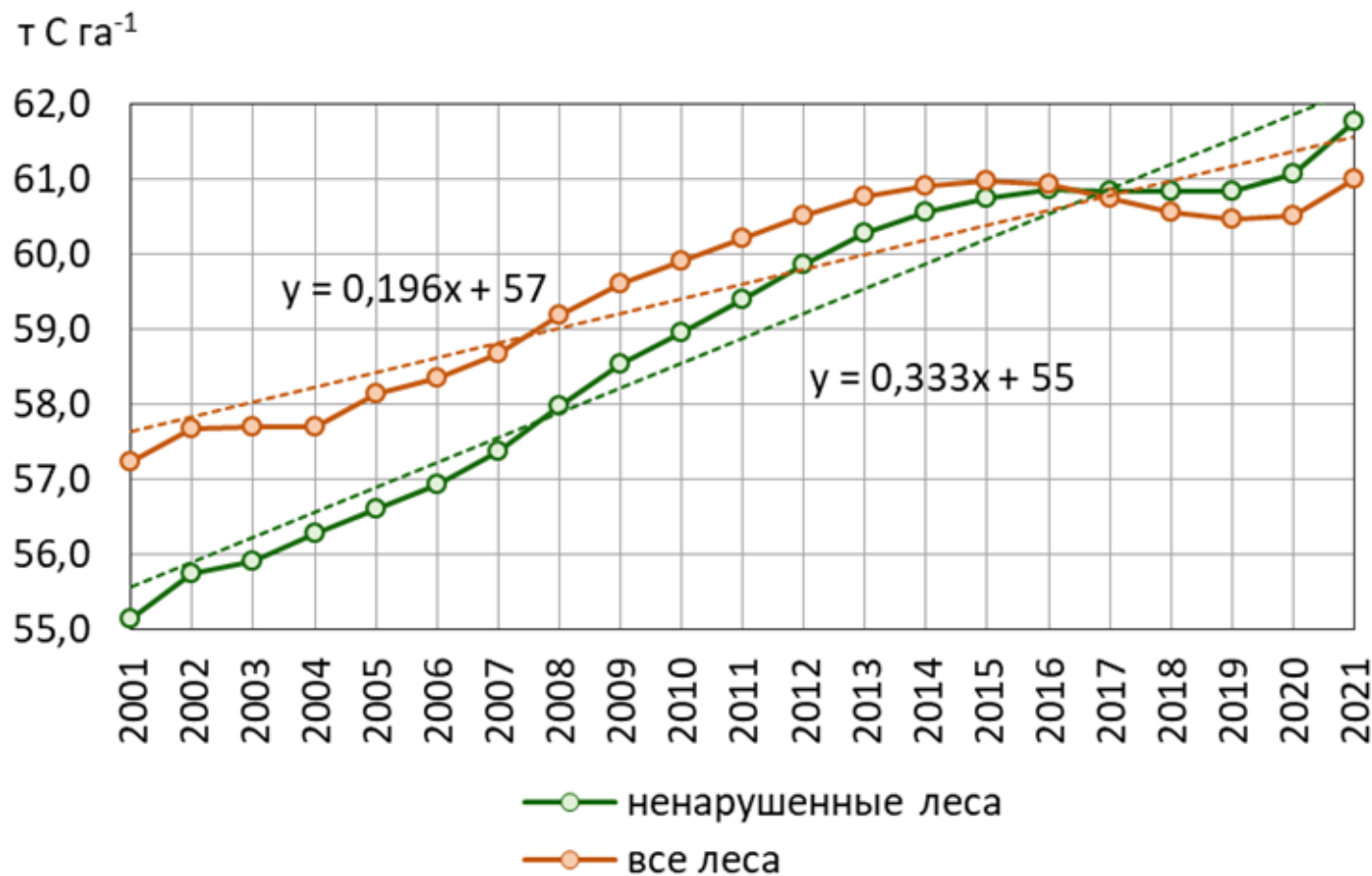
СРЕДНЕГОДОВОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЗАПАСА УГЛЕРОДА, т С га⁻¹ год⁻¹:



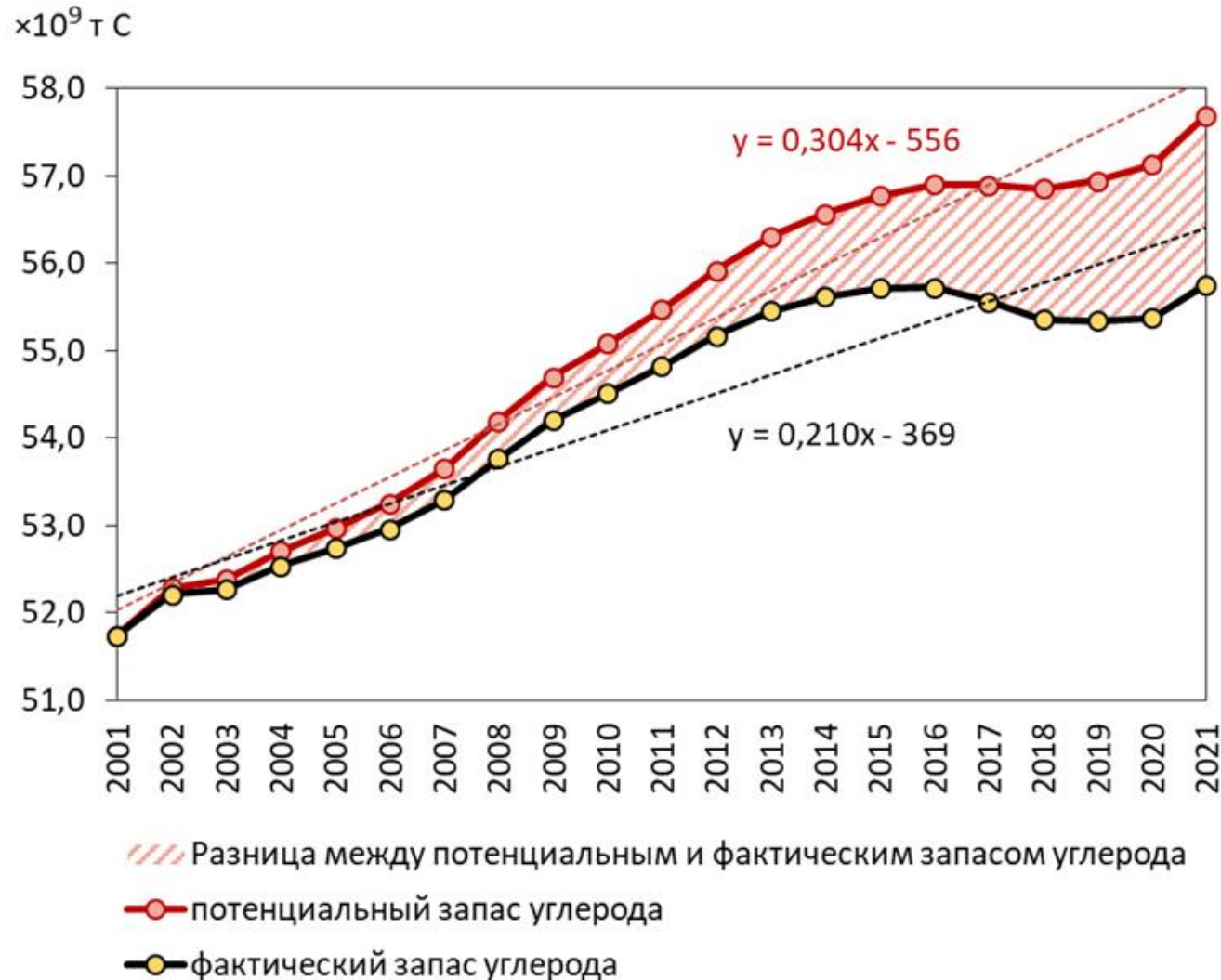
Динамика запасов углерода в фитомассе и мортмассе лесов России



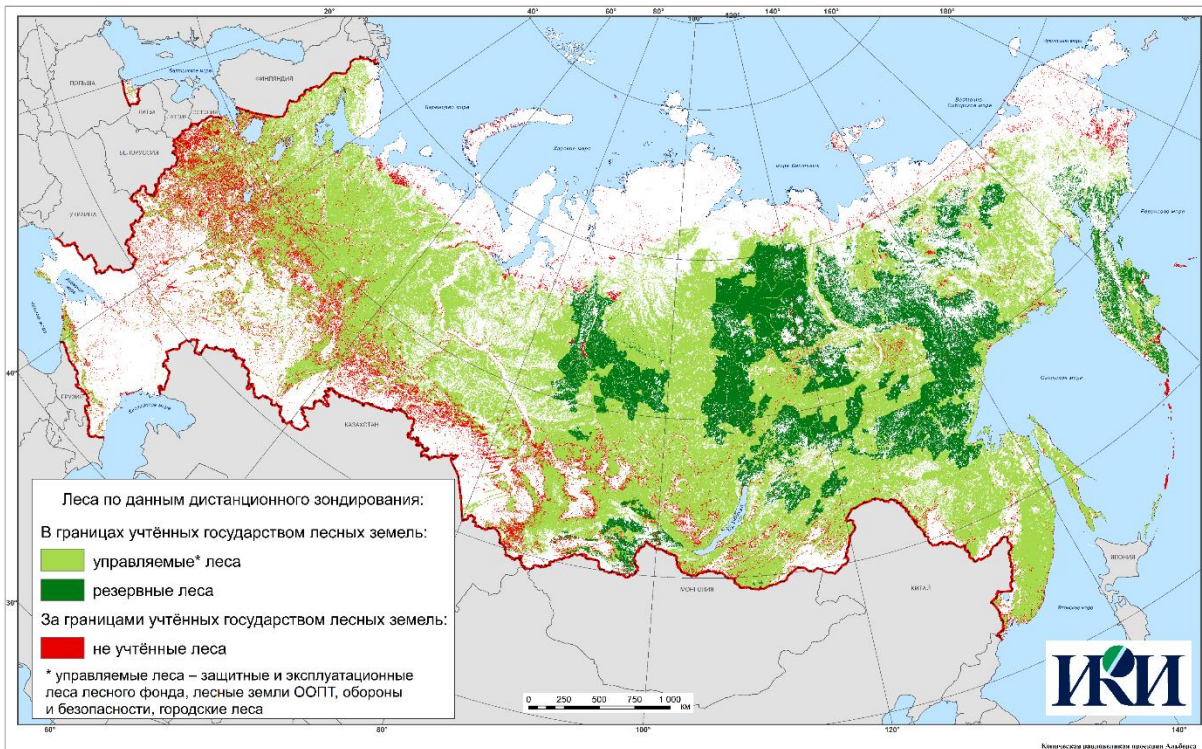
Динамика запасов углерода в биомассе нарушенных лесов России



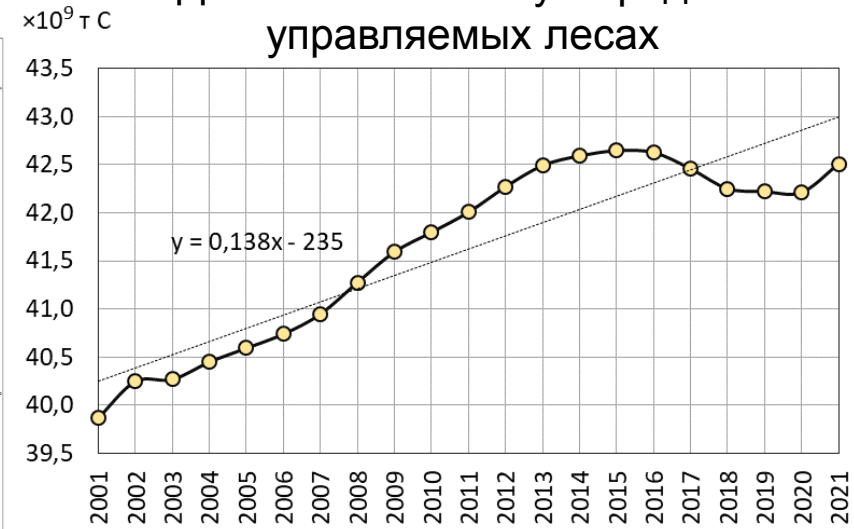
Динамика фактического и потенциального запаса углерода лесов России



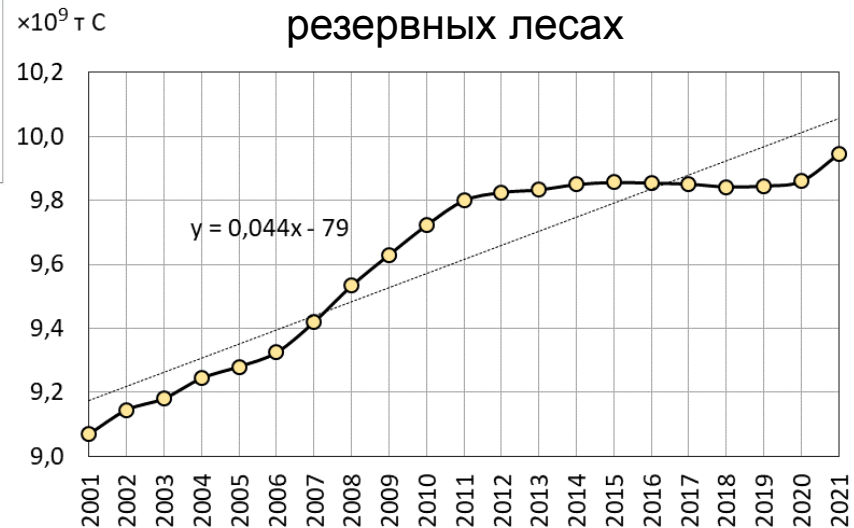
Динамика запаса углерода в управляемых и резервных лесах



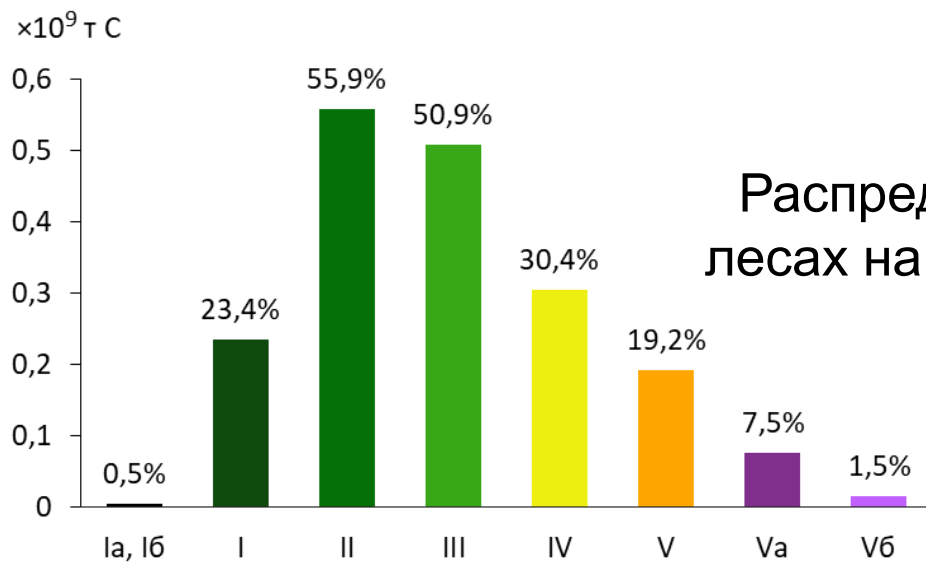
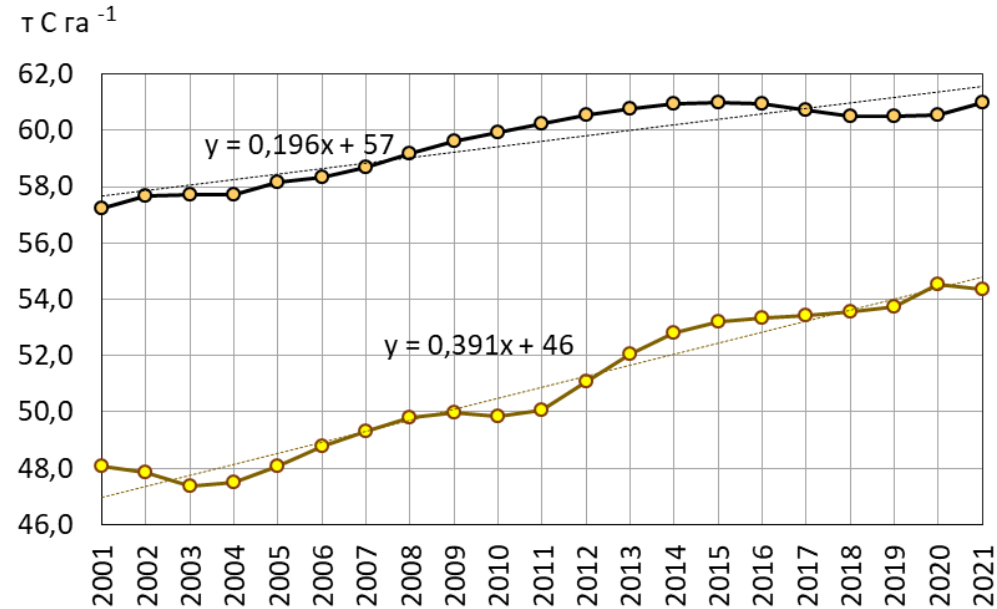
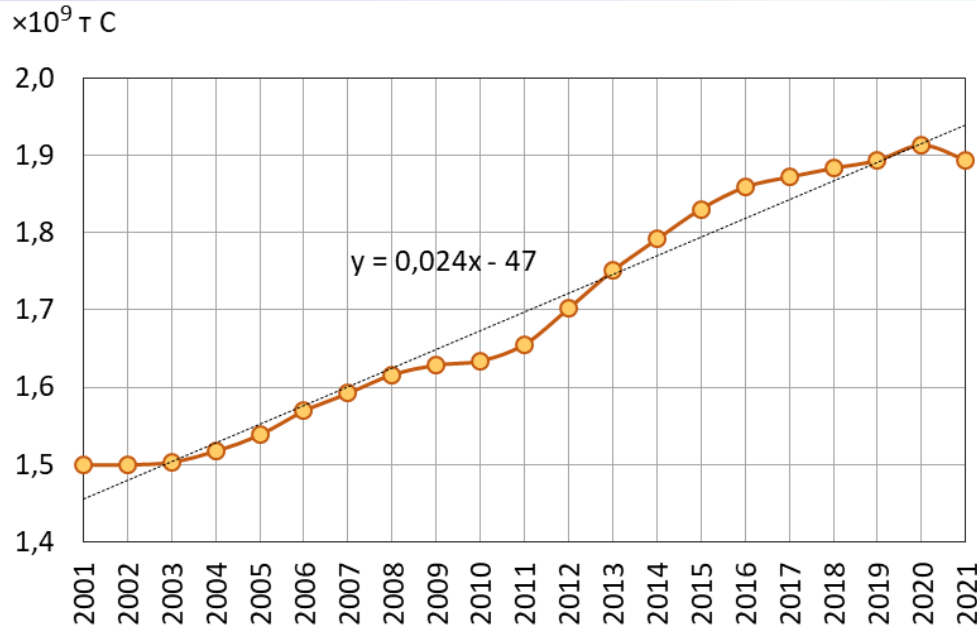
Динамика запаса углерода в управляемых лесах



Динамика запаса углерода в резервных лесах



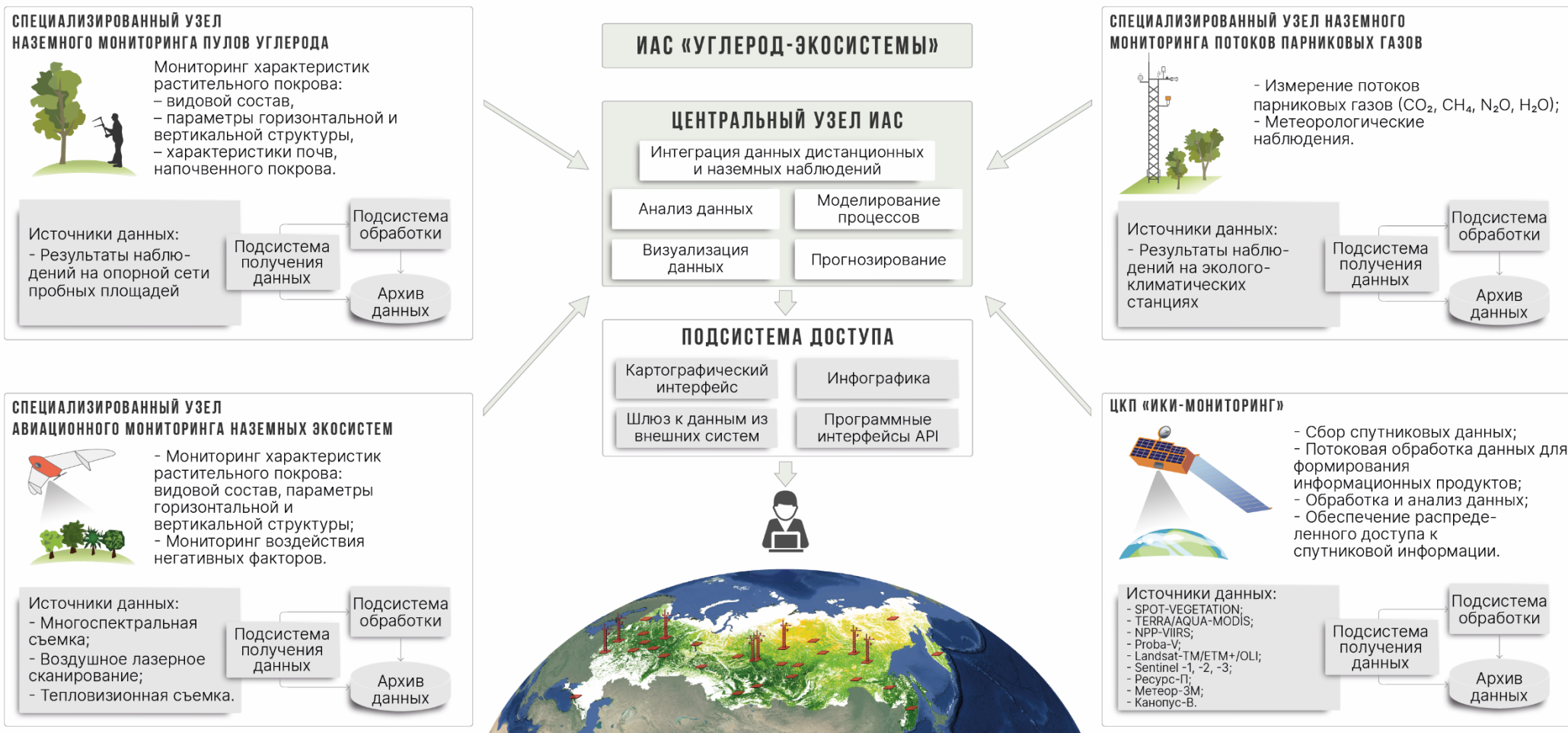
Динамика запаса углерода в лесах на заброшенных с/х землях



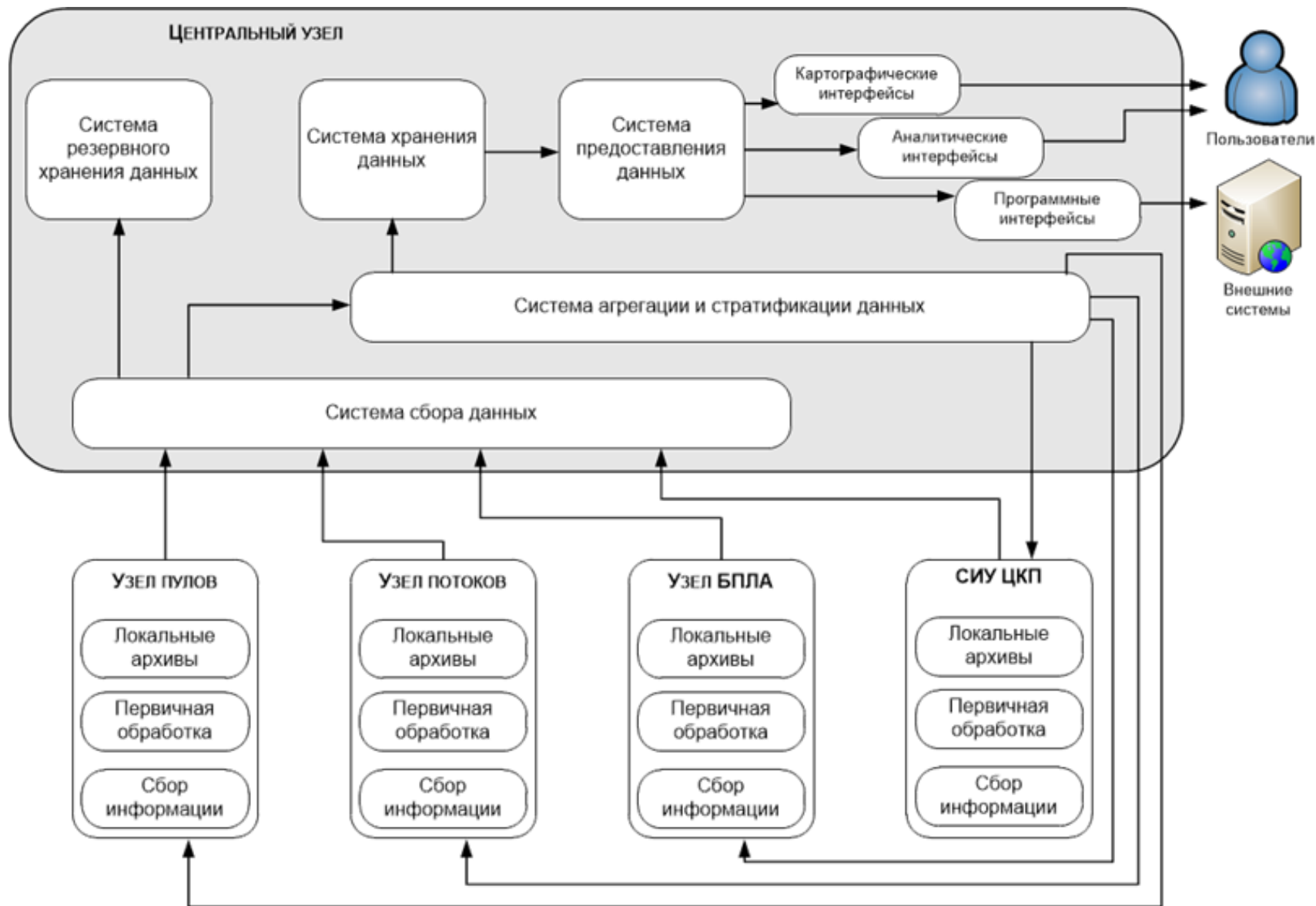
Распределение запаса углерода в лесах на заброшенных с/х землях по классу бонитета

- заброшенные с/х земли
- все леса

Информационно-аналитическая система мониторинга углерода наземных экосистем (ИАС «Углерод-Э»)



Базовая архитектура ИАС «Углерод-Э»



Основные технические характеристики ЦКП «ИКИ-МОНИТОРИНГ»

Около **6 ПБАЙТ** общий объем архивов данных в онлайн-доступе

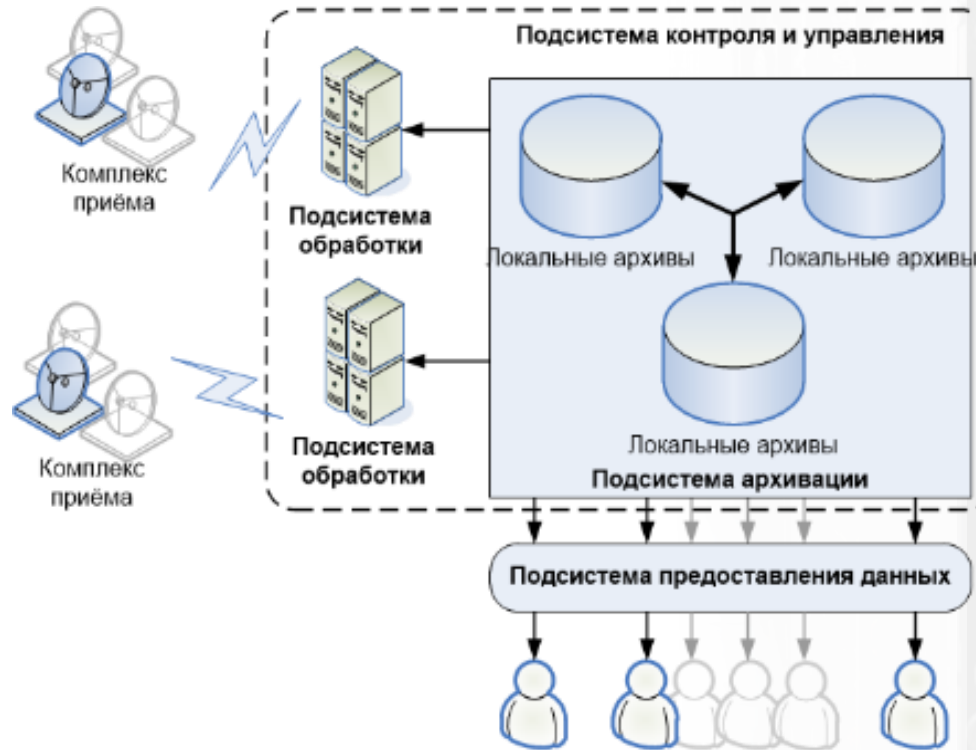
Около **5 ТБАЙТ/СУТКИ** возможная скорость обработки и усвоения данных в архивах

Более **8 ПБАЙТ** общая доступная емкость хранения данных онлайн

Более **15 УЗЛОВ** инфраструктуры виртуализации

Более **50 СЕРВЕРОВ** обеспечивают доступ к данным

Более **140 СЕРВЕРОВ** для обработки данных используются

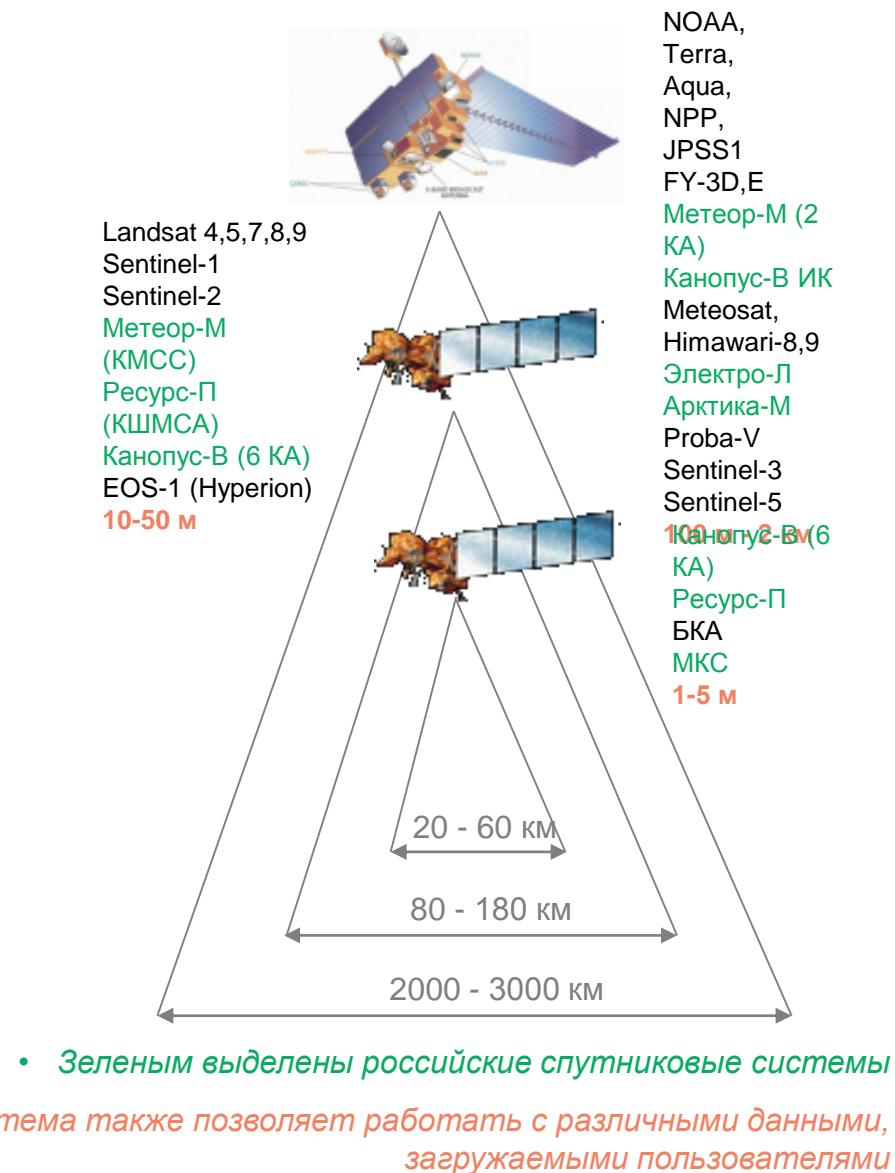


Информация приведена по состоянию на февраль 2023 года

Основные спутниковые данные ДЗЗ в составе ЦКП «ИКИ-МОНИТОРИНГ»

- Основная ориентация на использование **РОССИЙСКИХ** и **ОБЩЕДОСТУПНЫХ** зарубежных данных
- Информация в систему поступает из **РОССИЙСКИХ** и **ЗАРУБЕЖНЫХ ЦЕНТРОВ** сбора, обработки и архивации спутниковых данных
- Обеспечивает работу с данными **БОЛЕЕ ЧЕМ 40 СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**
- Обеспечивает работу с данными **БОЛЕЕ ЧЕМ 30 ТИПОВ ПРИБОРОВ** наблюдения
- **ГЛУБИНА АРХИВОВ** около 40 ЛЕТ

Информация приведена на февраль 2022



Интерфейс доступа пользователей в ИАС «Углерод-Э» (<http://carbon.geosmis.ru/>)



ИАС «Углерод-Э»

Пользователь: bartalev

[[Выход](#)]

- [Картографический интерфейс](#)
- [Оперативная информация о лесных пожарах](#)
- [Аналитическая отчётность](#)
- **Администрирование**
 - [Интерфейс управления проектом](#)
 - [Интерфейс управления пользователями](#)
 - [Интерфейс документирования и контроля](#)

Добро пожаловать в информационную систему [ИАС «Углерод-Э»](#) !

Информационная система ИАС «Углерод-Э» является действующим прототипом национальной информационно-аналитической системы мониторинга углерода в наземных экосистемах Российской Федерации (ИАС «Углерод Экосистем»)

Система обеспечивает

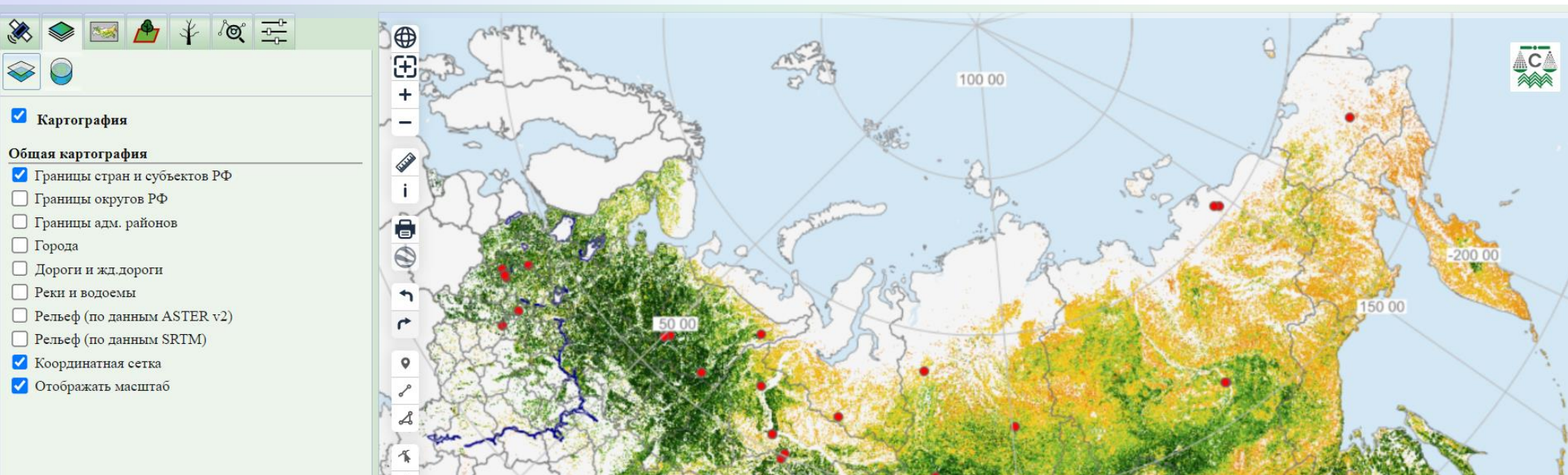
- получение ежегодно актуализируемой информации о качественных и количественных характеристиках лесов (площадь, запас древесины, преобладающая порода, полнота, бонитет, возраст и другие характеристики);
- получение ежегодной информации о бюджете углерода в лесах (динамика основных пулов, объемы эмиссии и поглощения углерода).
- получение информации о повреждениях лесов пожарами (пройденная огнем площадь, степень повреждения лесов и величина постпожарного отпада);

Прототип центрального информационного узла системы ИАС «Углерод-Э» создан и функционирует на основе инфраструктуры [Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг»](#).

Технологии автоматизированной обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли, используемые для создания информационной системы ИАС «Углерод-Э», разработаны при поддержке Минобрнауки России (Соглашение ЭБ 075-15-2019-1374, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0294).

Информационная система ИАС «Углерод-Э» разработана [Институтом космических исследований Российской академии наук \(отдел Технологии спутникового мониторинга\)](#) при участии [Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук \(ЦЭПЛ РАН\)](#).

Картографический интерфейс работы с данными ИАС «Углерод-Э»



Анализ динамики запасов углерода в растительной биомассе лесов Республики Саха

Заключительные замечания

- 1) В последние годы в России развитие получили **методы дистанционного зондирования углерода лесов**, что создало условия для разработок соответствующего функционала национальной системы мониторинга. Требуются дополнительные исследования по верификации получаемых результатов и дальнейшего развития технологий обработки данных ДЗЗ для мониторинга углерода лесов. Необходима также разработка подходов к оценке почвенного углерода в лесах с использованием результатов ДЗЗ .
- 2) Необходимы широкомасштабные исследования в области дистанционного мониторинга углерода болотных, травяно-кустарниковых, тундровых и других типов наземных экосистем.
- 3) **Требуется развитие сети тестовых полигонов** для сбора наземных опорных данных, а также **тесная интеграция методов ДЗЗ с наземными данными и математическими моделями** для мониторинга углерода наземных экосистем с целью достижения более высокой полноты и точности получаемых оценок.
- 4) Потребуется значительный объем дополнительных работ по адаптации разрабатываемых методов и технологий к **использованию данных перспективных отечественных и зарубежных спутниковых систем ДЗЗ**.



Спасибо за внимание !