

Технология оценки баланса и динамики углерода лесов России на основе данных ДЗЗ

Хвостиков С.А.

khvostikov@d902.iki.rssi.ru

Институт Космических Исследований РАН

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

Работа выполнена в рамках проекта в рамках проекта Российского научного фонда № 19-77-30015 «Разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях глобальных изменений климата»

«Космическая научная обсерватория углерода лесов России»

Двадцатая международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

ИКИ РАН 14 – 18 ноября 2022 г.

Введение

Изучение баланса и потоков углерода важно в контексте проблемы глобального изменения климата;

Леса - одно из крупнейших наземных хранилищ углерода, и изменение климата и деятельность человека сильно сказываются на них;

На Россию приходится более 20% общей площади лесного покрова Земли. При этом основные изменения климата прогнозируются в северных бореальных системах.

Методы оценки углерода

Для оценки углерода лесов используется множество разных данных:

- Данные инвентаризации лесов
- Данные наземных наблюдений
- Измерения потоков методом турбулентных пульсаций (eddy covariance)
- Спутниковые данные
 - Характеристики лесов
 - Биомасса, продуктивность
 - Эмиссия парниковых газов
- ...

Для оценки углерода лесов используются множество разных методов:

- Модельные подходы
 - Конверсионные коэффициенты
 - Модели процессов в лесах
 - Light Use Efficiency models
 - ...
- Машинное обучение,
 - Оценки характеристик лесов
 - Оценка потоков – GPP, NPP
 - ...

По спутниковым методам оценки углерода:

Xiao J. et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years //Remote Sensing of Environment. – 2019. – Т. 233. – С. 111383.

Пример различных методов оценки углерода лесов России:

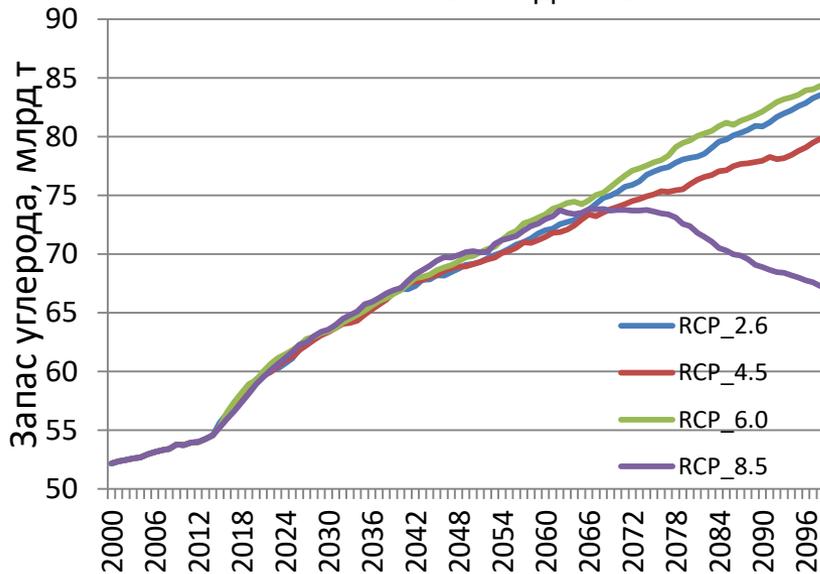
Dolman A. J. et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods //Biogeosciences. – 2012. – Т. 9. – №. 12. – С. 5323-5340.

Оценка углерода на основе глобальных моделей

Еще один вариант оценки углерода – по глобальным моделям динамики растительности (DGVM);

Для их работы нужны только климатические данные за длительный период времени, на их основе они воспроизводят оценку динамики характеристик растительности.

Пример прогнозирования динамики углерода лесов России на основе модели LPJmI4

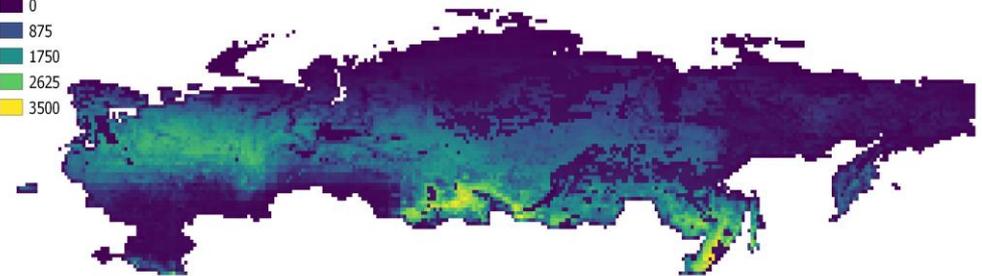


Пример прогнозного запаса на 2100 год

Запас углерода, млн т



RCP 2.6



Запас углерода, млн т



RCP 8.5

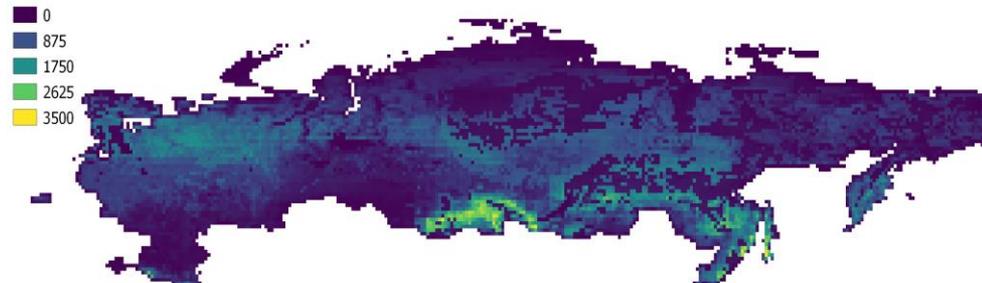


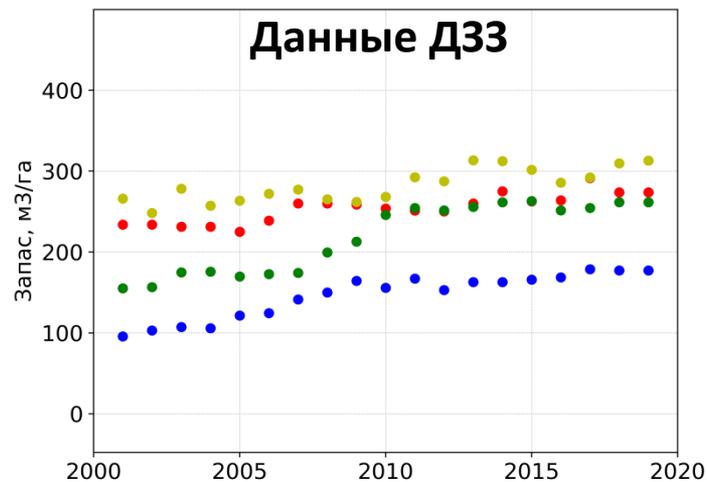
Схема оценки углерода



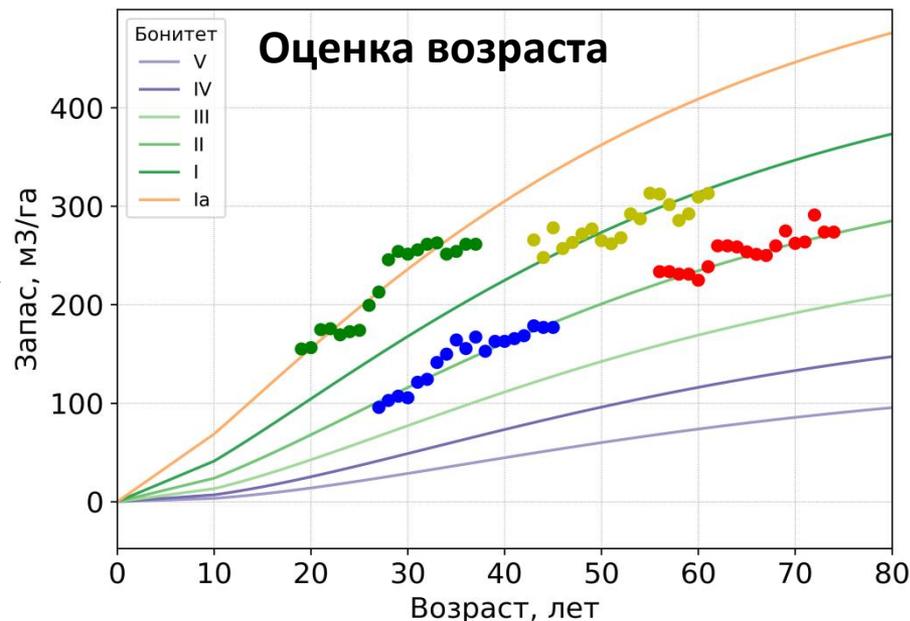
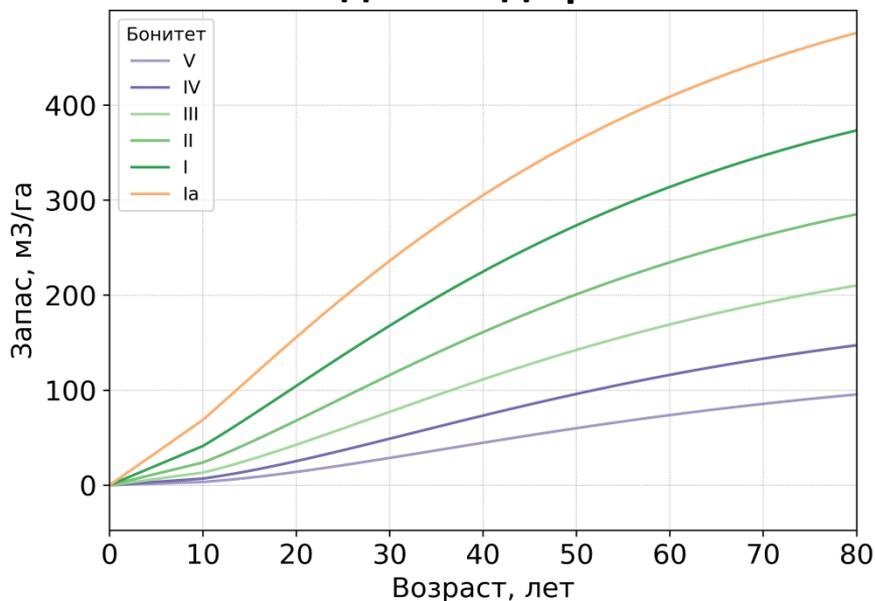
Оценка возраста

Возраст лесов оценивался по данным о бонитете, породе и запасе, совмещенных с моделями хода роста (Швиденко и др., 2008).

Была проведена дополнительная обработка на основе данных о нарушениях.

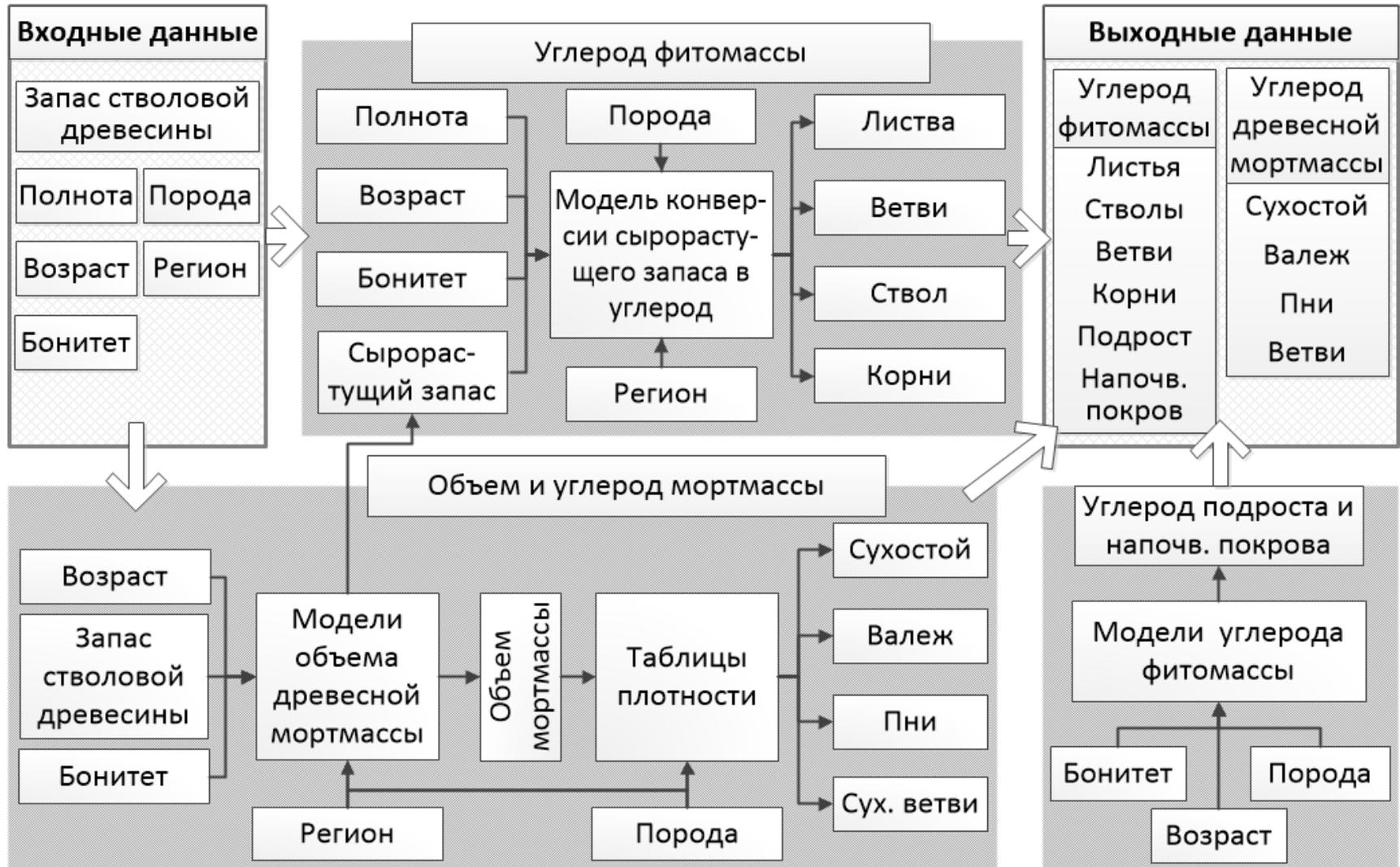


Модели хода роста



Оценка углерода нормальных лесов

Оценка фракций фитомассы, мортмассы и углерода различных пулов

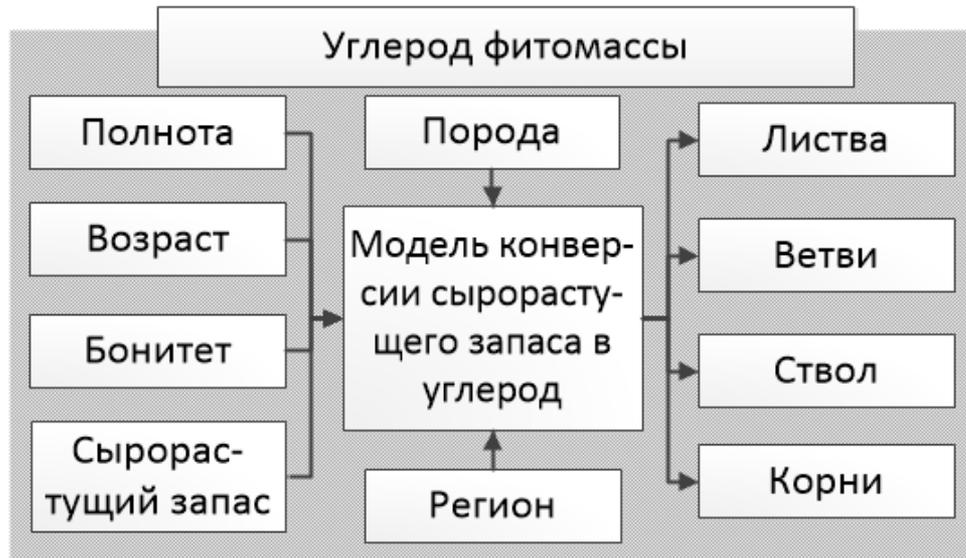


Оценка углерода фитомассы

Основывается на конверсионных коэффициентах BCEF (Schepaschenko et al., 2018).

Задаются для фракций ствола, ветвей, листвы и коры формулами вида:
$$\text{Logit}(BCEF_{fr}) = a_0 + a_1 * \log A + a_2 * \log SI + a_3 * \log RS + a_4 * A + a_5 * RS$$

Где a_i – модельные коэффициенты для породы и региона,
A – возраст, SI – бонитет, RS – полнота.



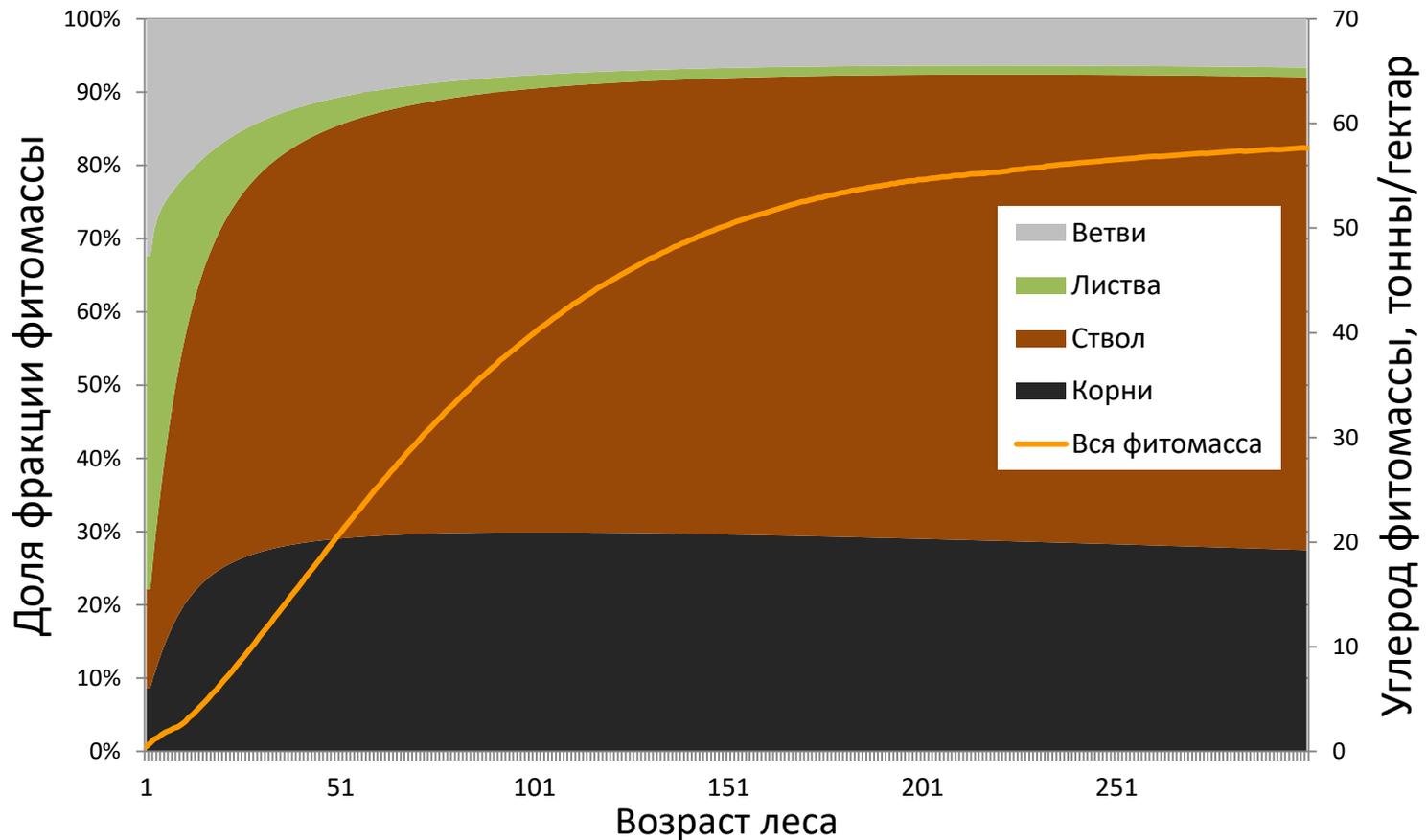
Углерод получается простым умножением сырорастущего запаса:

$$\text{УГЛЕРОД}_{fr} = BCEF_{fr} * \text{ЗАПАС}$$

Коэффициенты получены на основе 8000 наземных наблюдений.

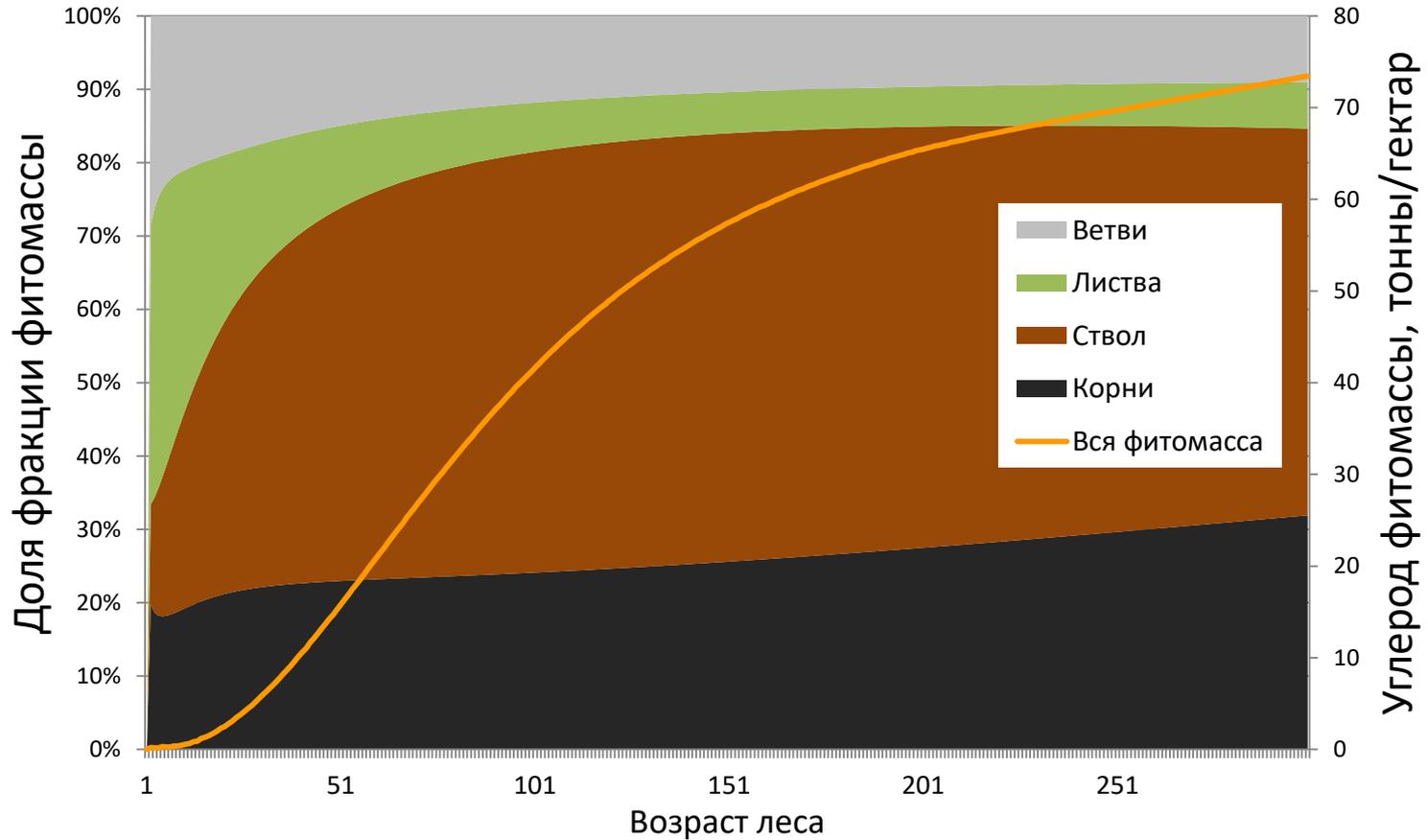
Пример динамики углерода фитомассы

Пример динамики для лиственницы V бонитета

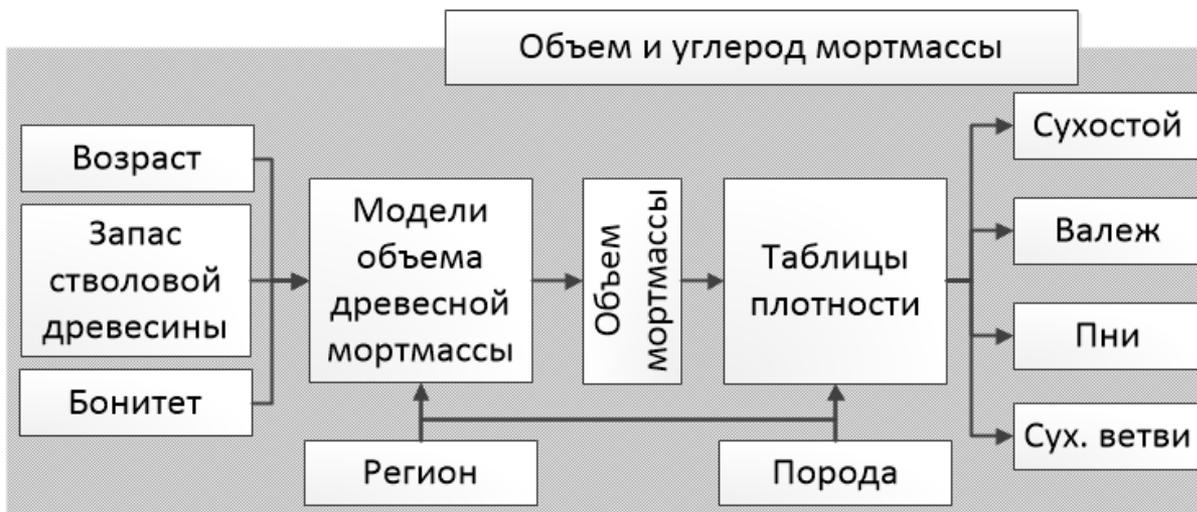


Пример динамики углерода фитомассы

Пример динамики для ели V бонитета



Оценка углерода мортмассы



В рамках проекта на основе 3000 наземных наблюдений также были получены регрессионные модели:

Для сухостоя и валежа:

$$R_{(сух/влж)}C = a_{11} \cdot \exp(-b_{11} \cdot A) + a_{12} \cdot \exp(b_{12} \cdot A)$$

$$\Delta = a_{21} \cdot \exp(-b_{21} \cdot A) + a_{22} \cdot \exp(b_{22} \cdot A)$$

$$R_{(сух/влж)}SI = R_{(сух/влж)}C + (SI - C) \cdot \Delta$$

Для сухих ветвей:

$$R_{ветви} = c_0 + c_1 \cdot A + c_2 \cdot A^2 + c_3 \cdot A^3$$

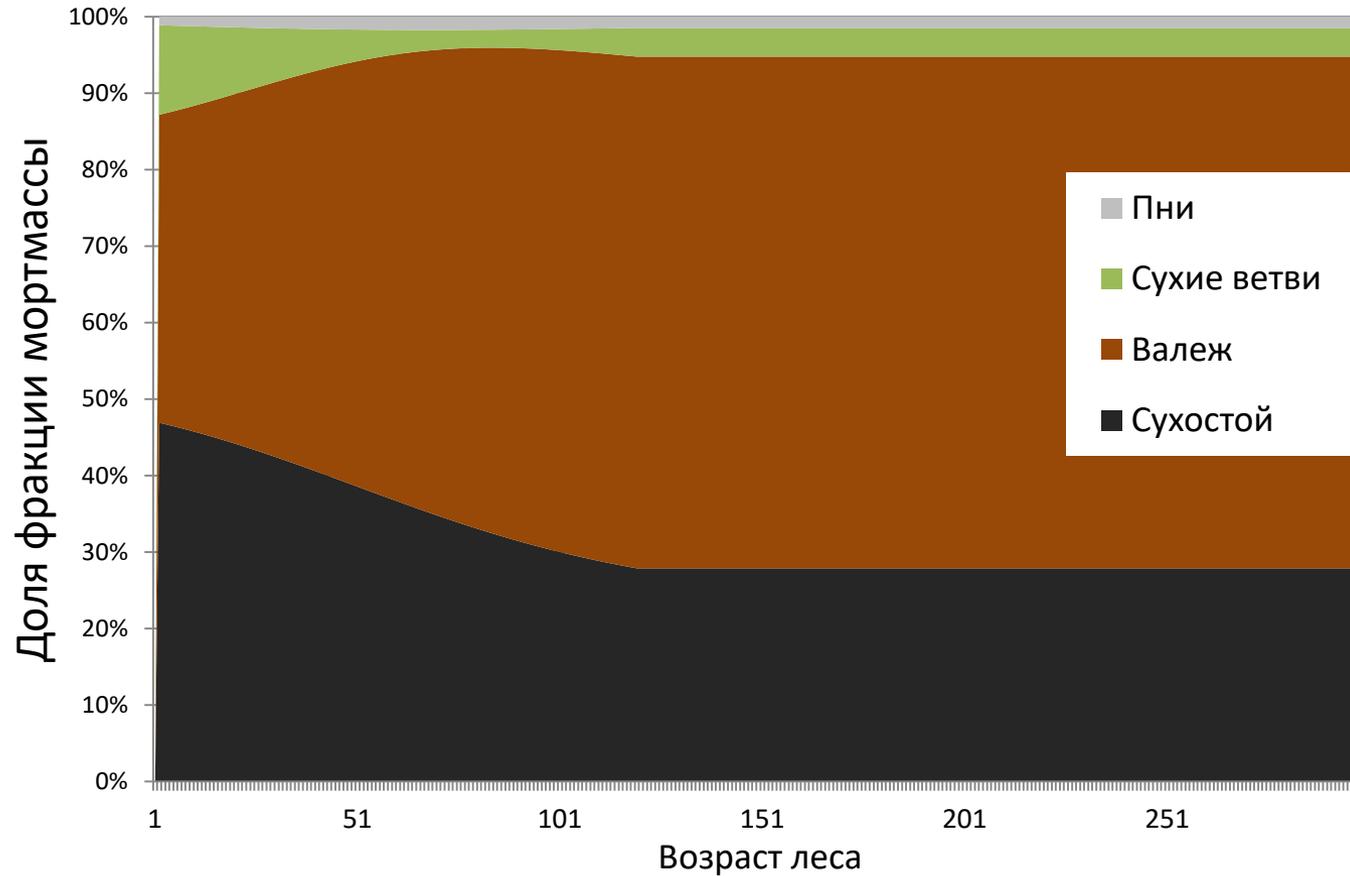
Где а, b, с – модельные коэффициенты для породы и региона, А – возраст, SI – бонитет, С – средний бонитет,

Для пересчета объема в массу используются таблицы плотностей:

Порода	Плотность		
	Зона 1	Зона 2	...
Сухостой			
Сосна	0.449	0.437	...
Листв.	0.494	0.459	...
Валеж			
Сосна	0.385	0.359	...
Листв.	0.370	0.345	...

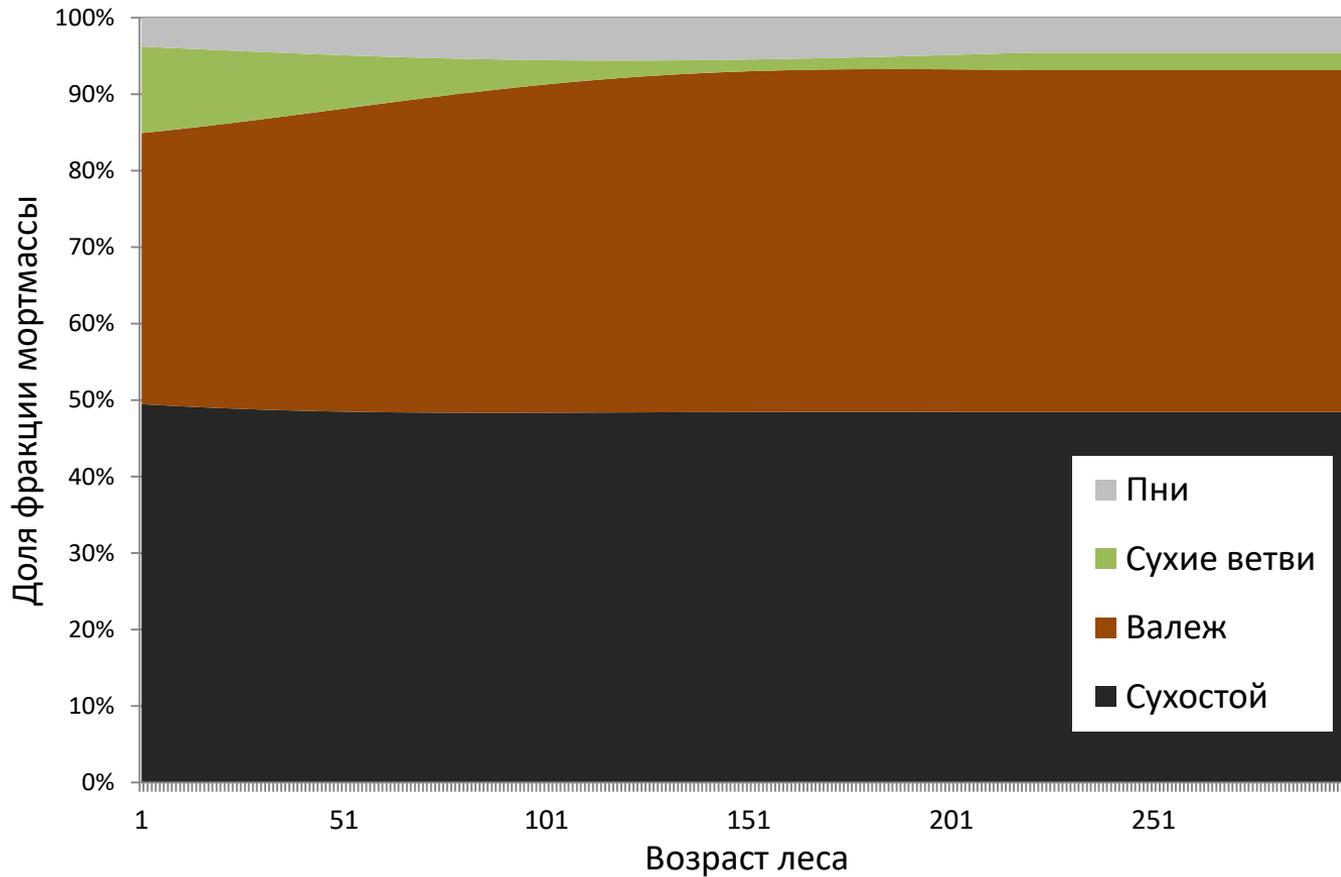
Пример динамики мортмассы

Пример динамики для березы IV бонитета

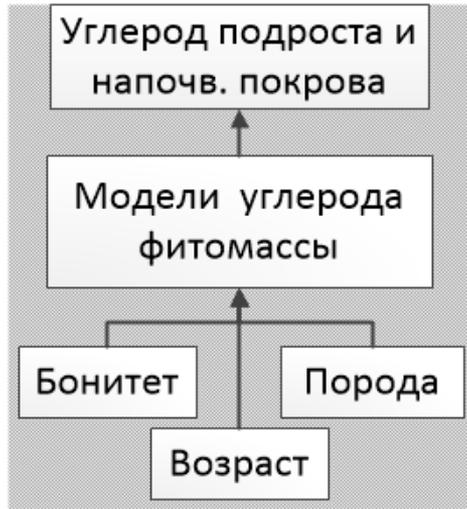


Пример динамики мортмассы

Пример динамики для лиственницы V бонитета



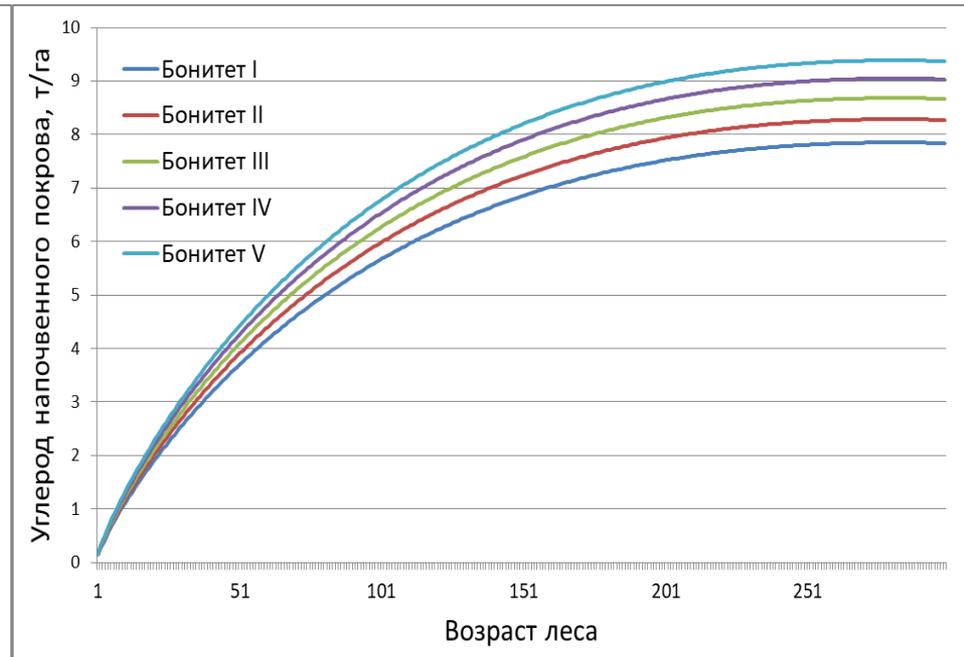
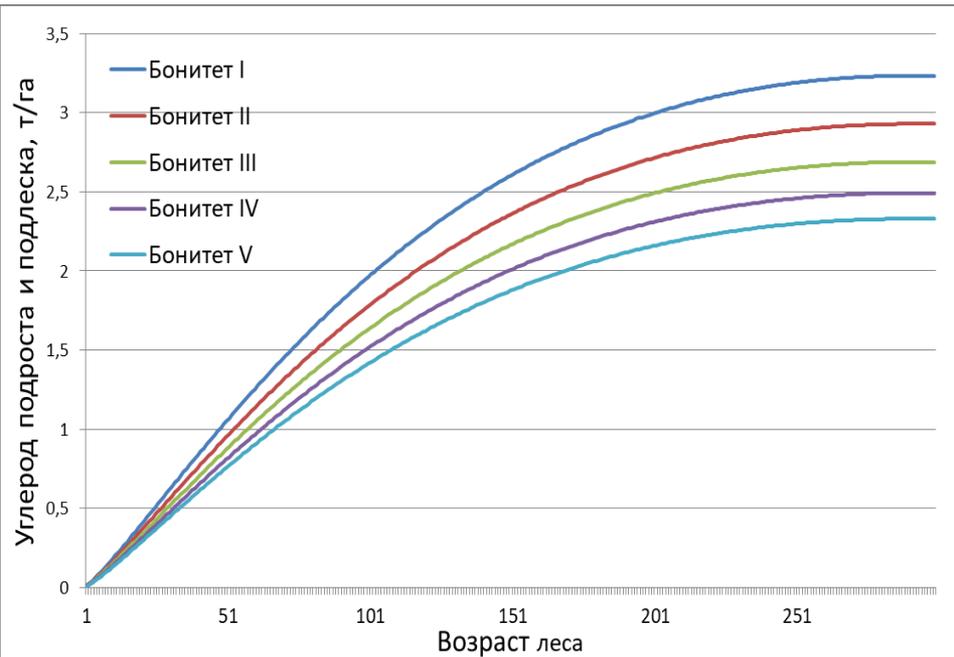
Оценка углерода подроста и напочвенного покрова



Используются модели из таблиц хода роста (Швиденко и др., 2008), выражаемые формулой:

$$M_{fr} = c_0 SI^{c_1} A^{(c_2 + c_3 * RS + c_4 * RS^2)}$$

Где M – масса фракции, c_i – коэффициенты для породы, SI – бонитет, RS – полнота, A – возраст.



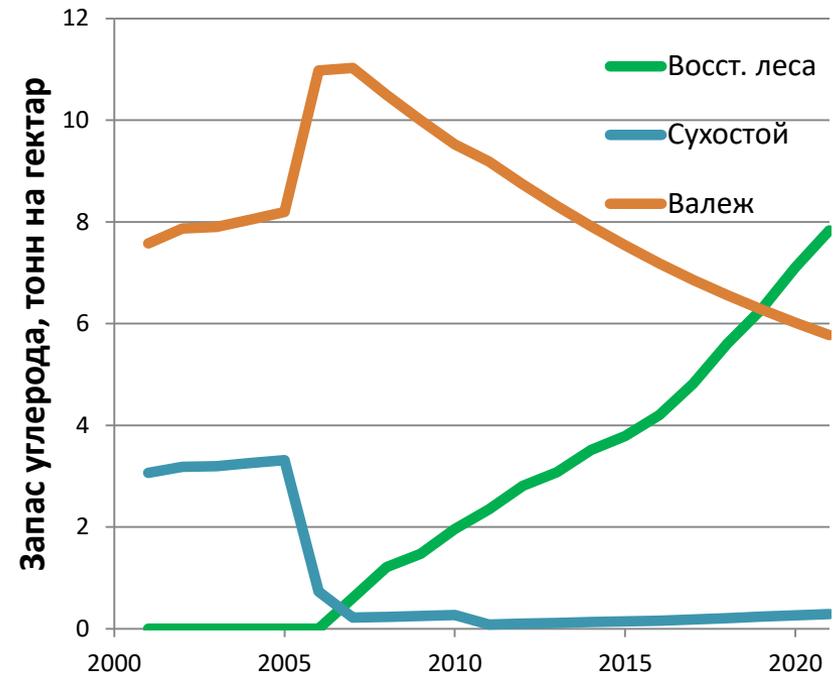
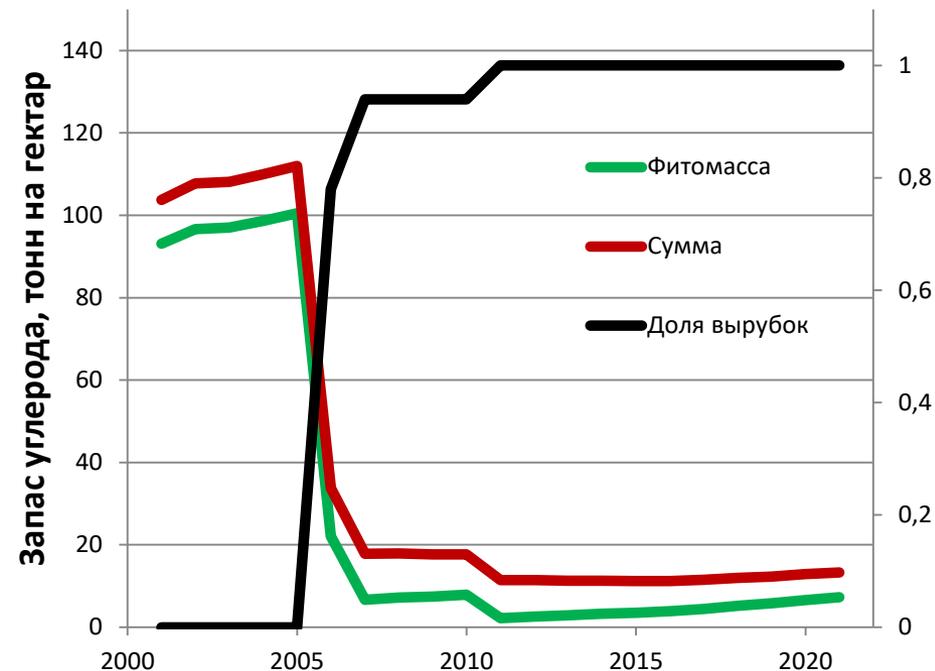
Оценка углерода нарушенных лесов



Оценка углерода на рубках

- Извлекается углерод фитомассы;
- Сухостой переводится в валеж;
- Моделируется разложение сухостоя и валежа;
- Моделируется лесовосстановление.

Пример динамики запаса после рубки для березового леса Вологодской области



Оценка углерода на горях и усыханиях

- Углерод фитомассы переводится в сухостой;
- По данным ДЗЗ оценивается процесс вывала сухостоя;
- Моделируется разложение сухостоя и валежа;
- Моделируется лесовосстановление.

Пример динамики запаса после гари для лиственничного леса Якутии

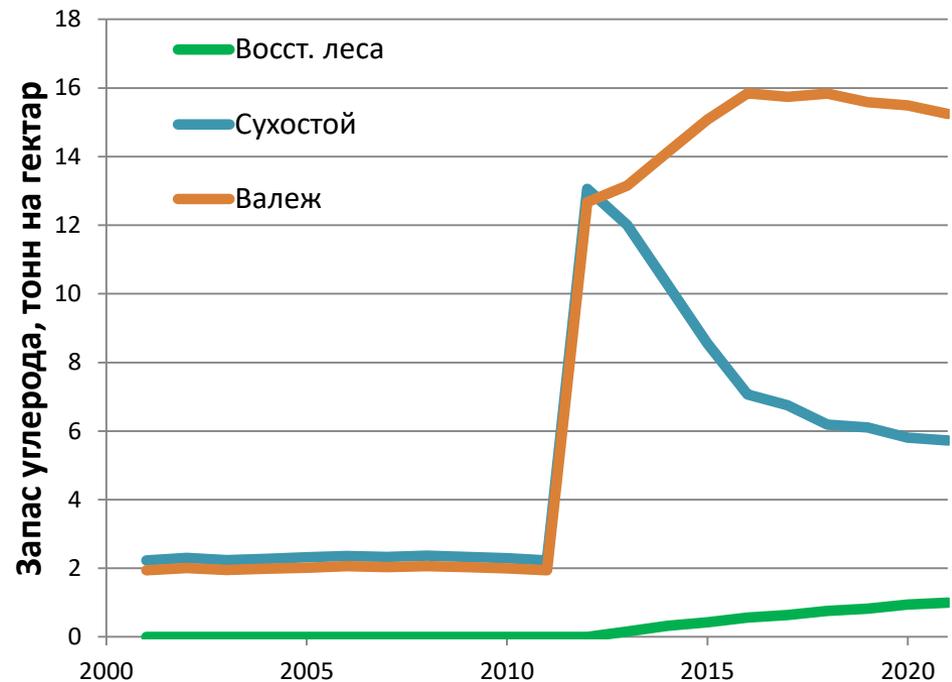
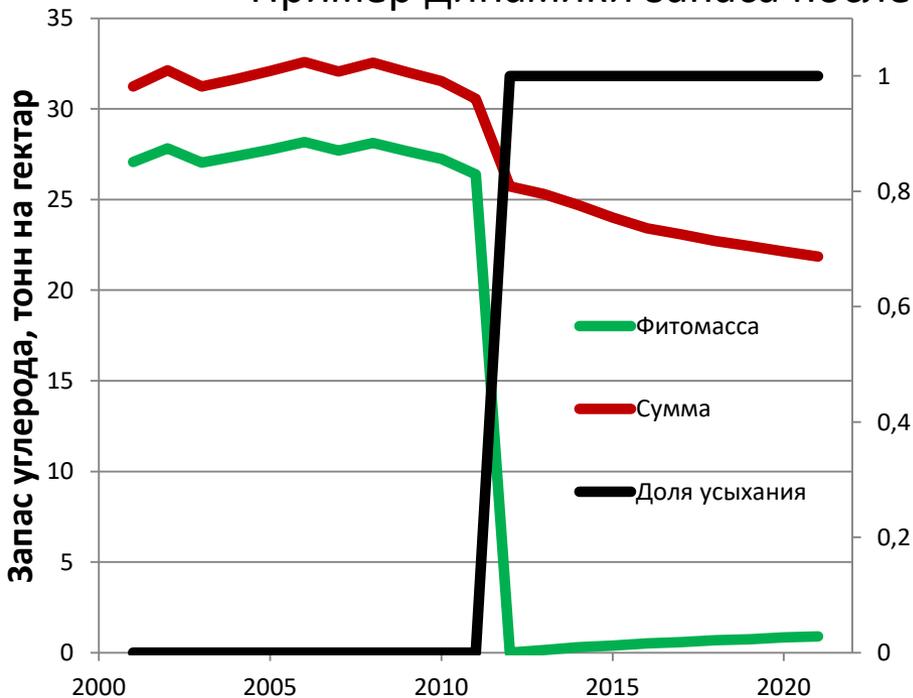
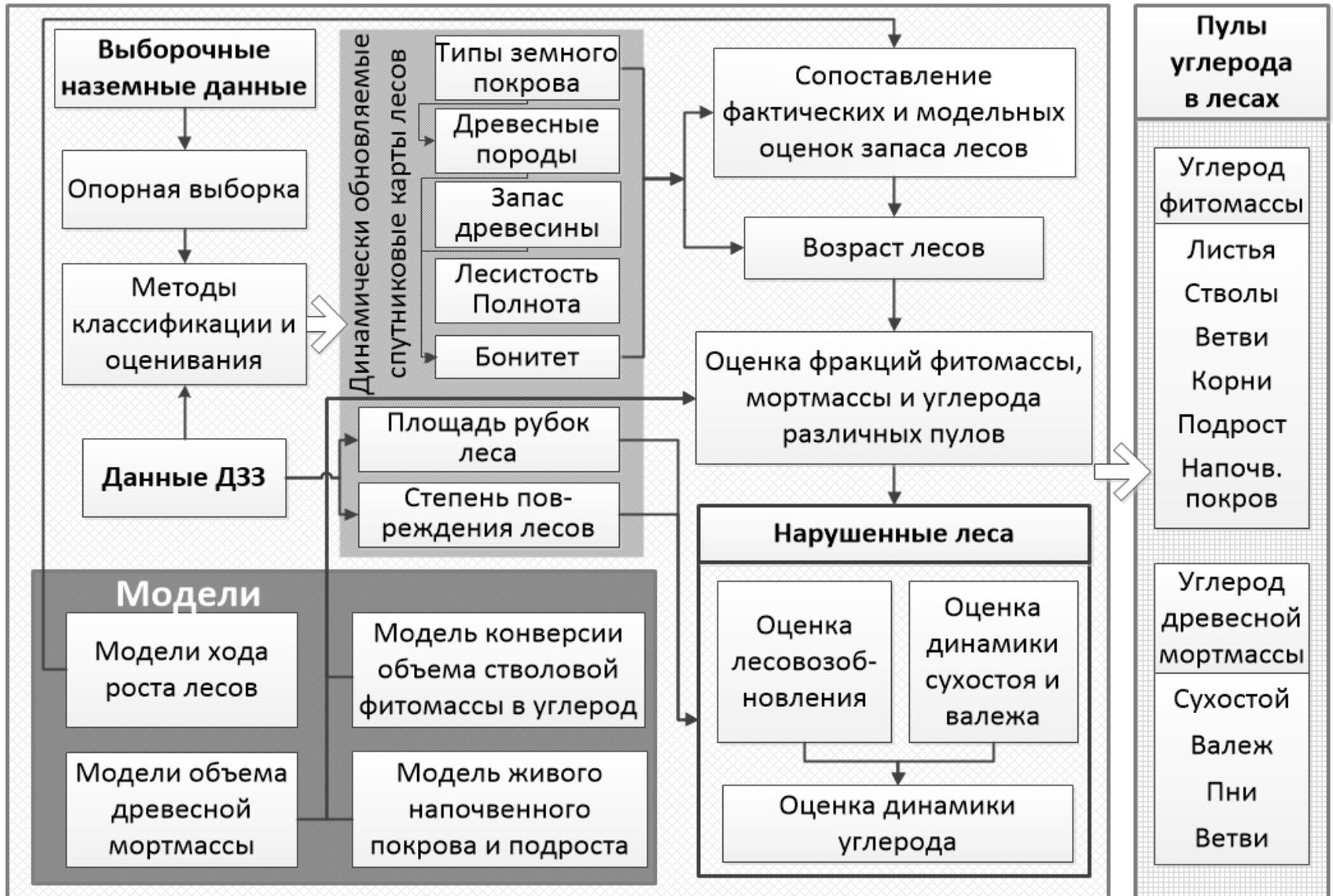
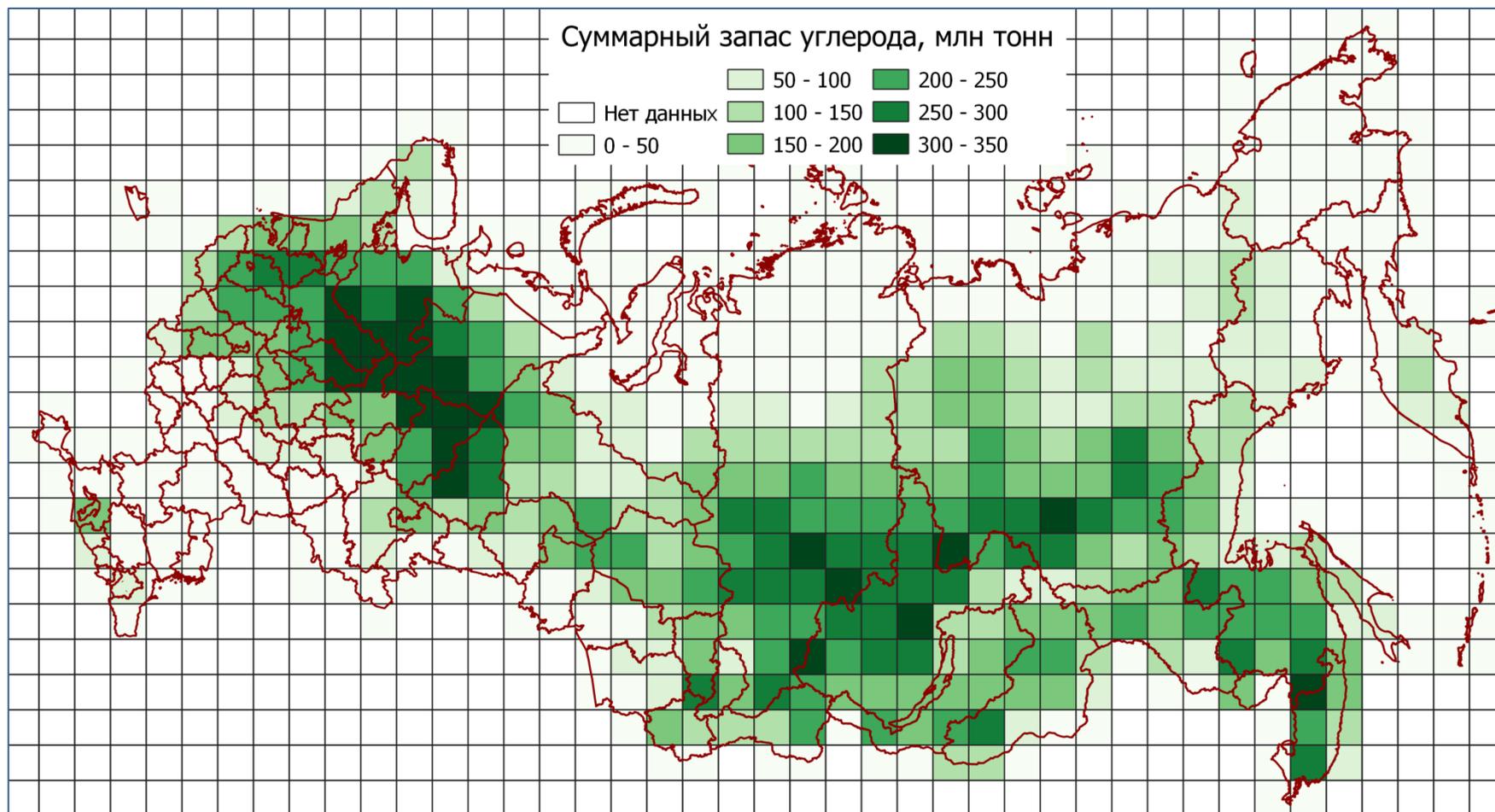


Схема оценки углерода в ИКИ РАН



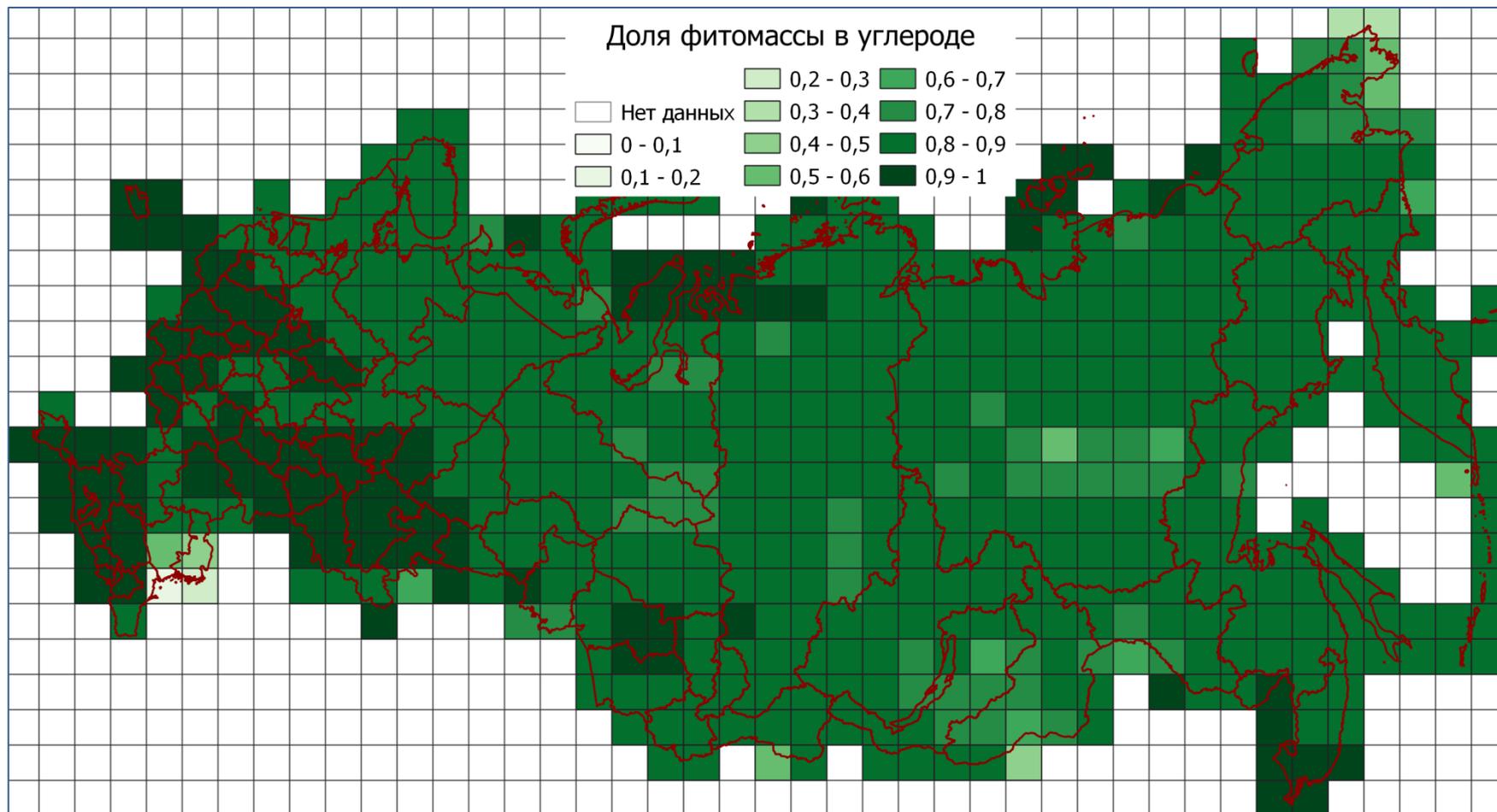
Оценка запаса углерода

На регулярной сетке хорошо видны области, в которых находится наиболее значительный запас углерода лесов.



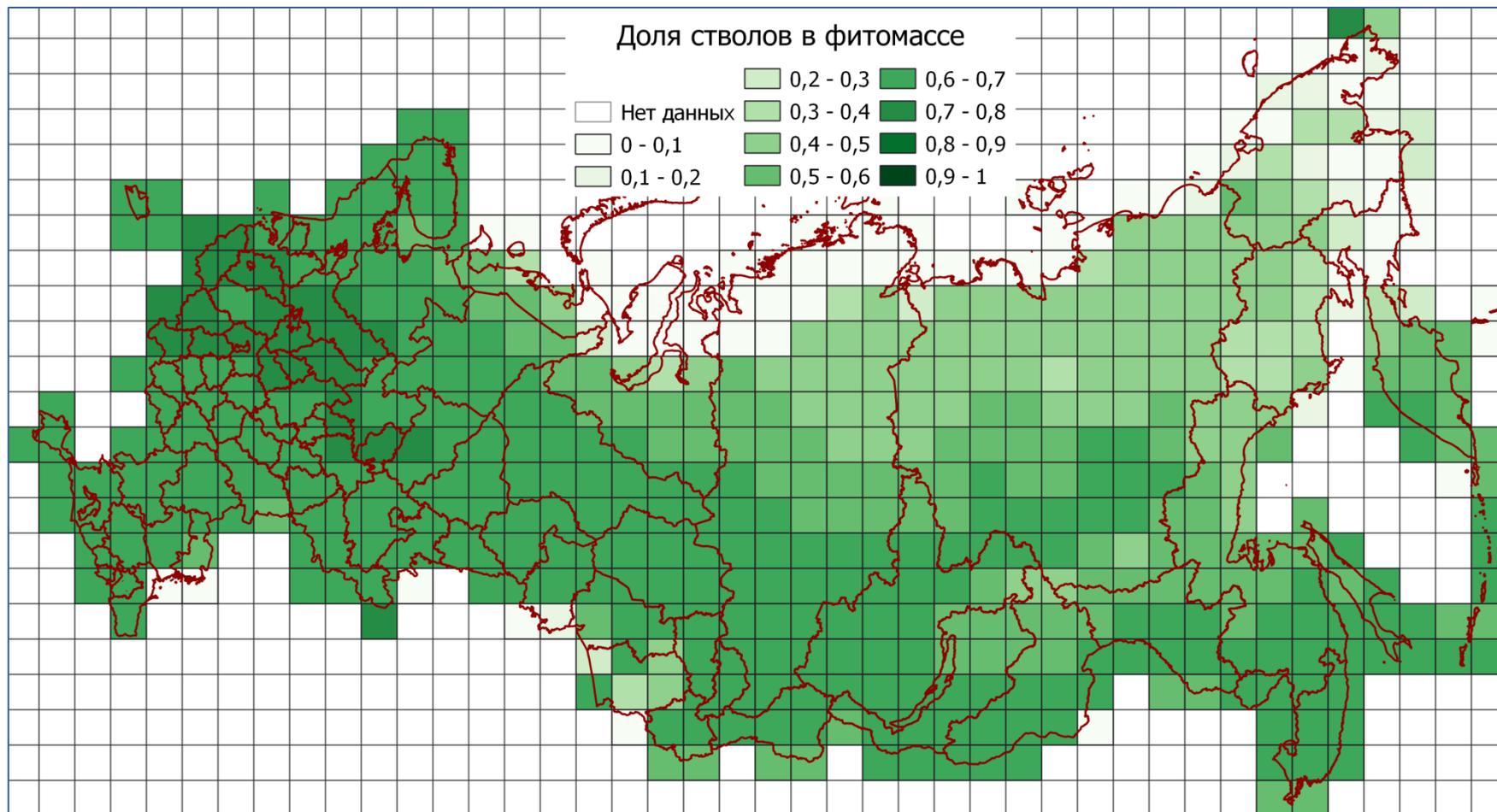
Оценка запаса углерода

Основной запас углерода содержится в фитомассе



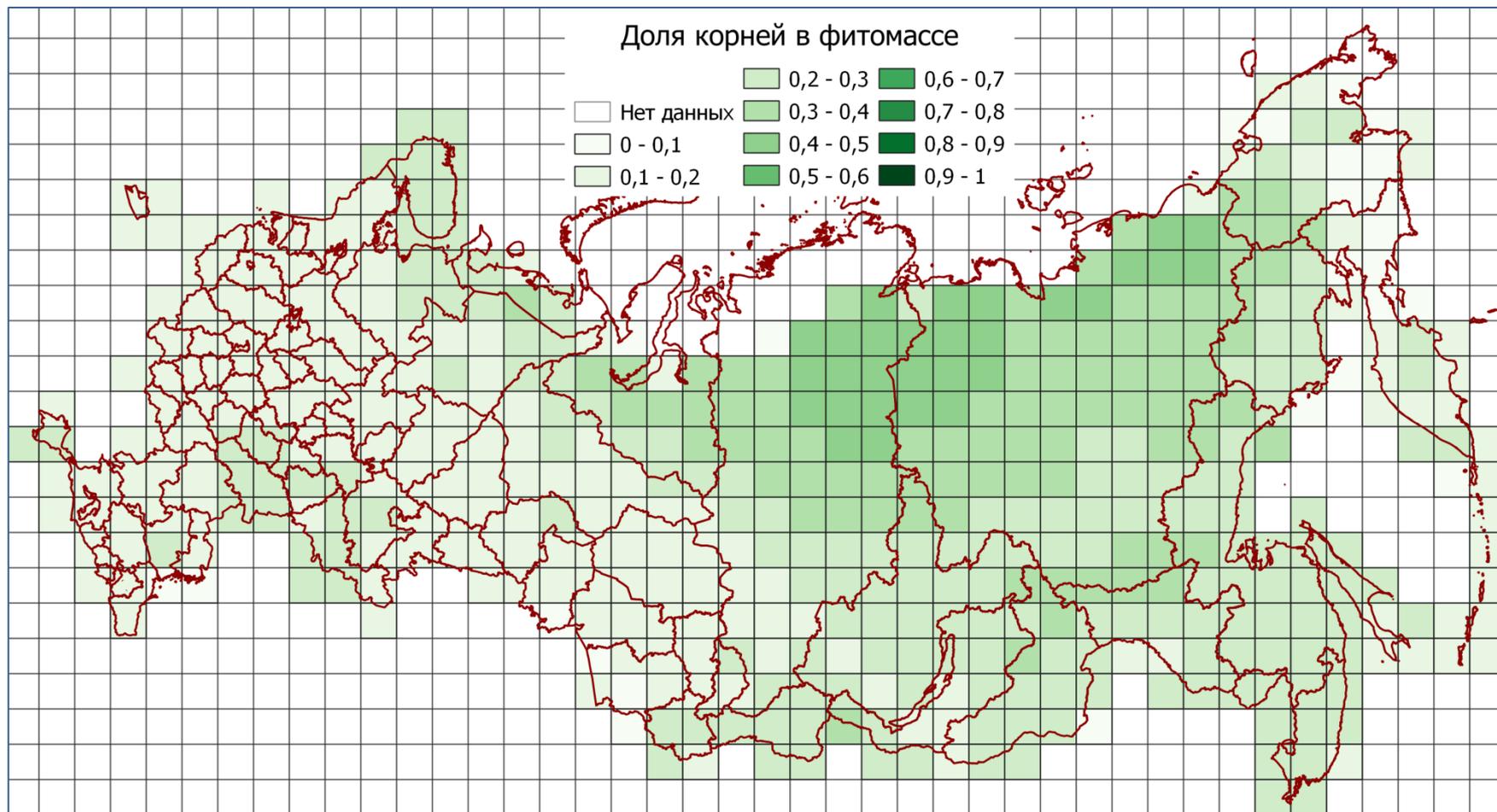
Оценка запаса углерода

Запас стволов больше, чем запас корней, соотношение падает к северу



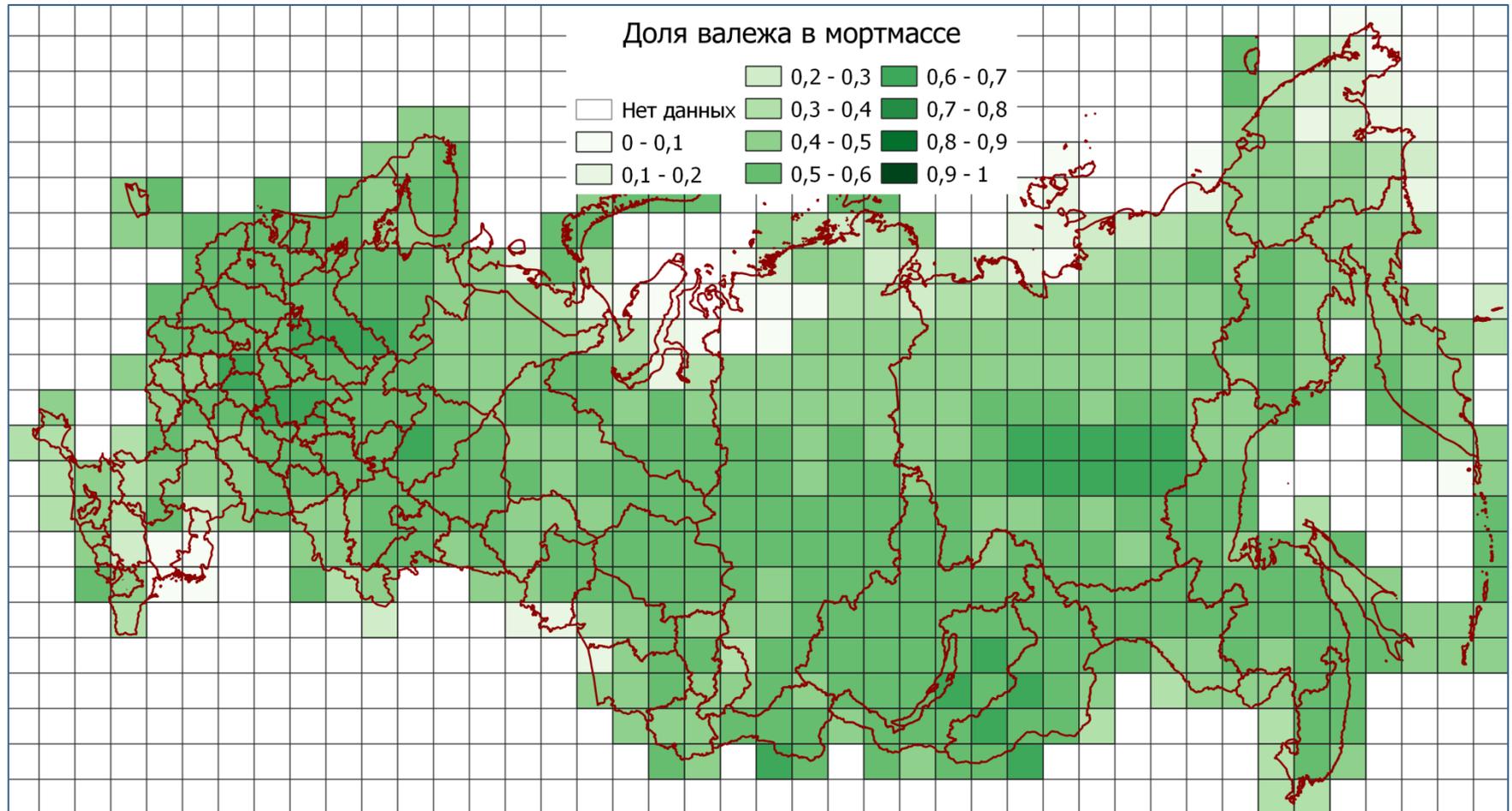
Оценка запаса углерода

Запас стволов больше, чем запас корней, соотношение падает к северу



Оценка запаса углерода

На картах других фракций фитомассы и мортмассы нет характерных особенностей.

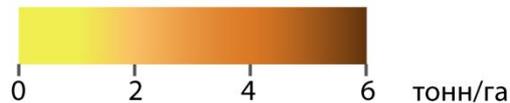


Анализ оценки углерода

По предложенному подходу карта валежа похожа на карту нарушений.



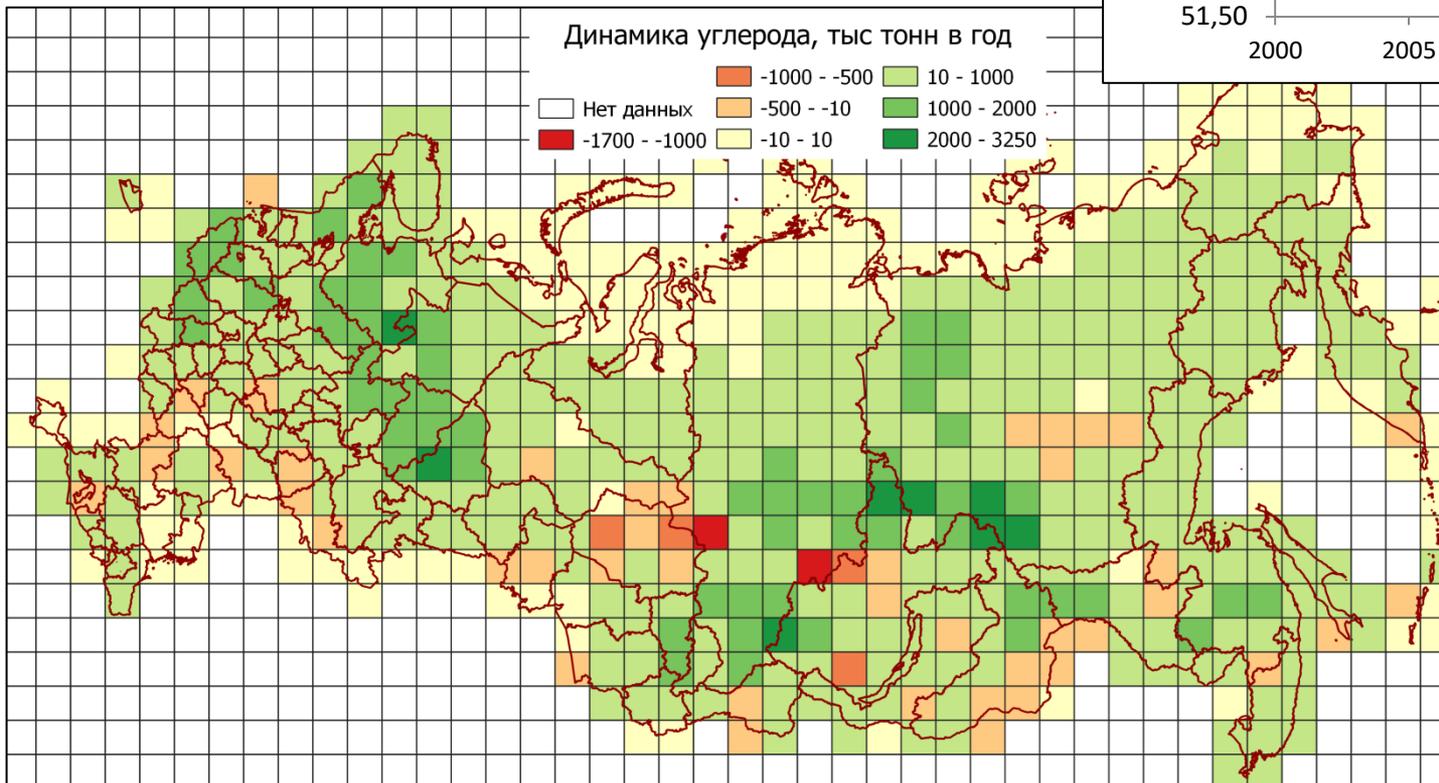
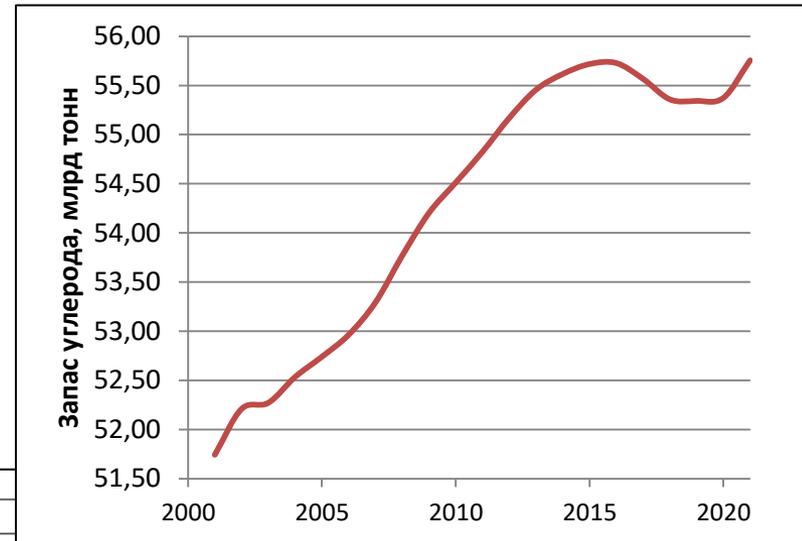
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
УДЕЛЬНЫЙ ЗАПАС УГЛЕРОДА:



Динамика углерода

Почти на всей территории страны динамика углерода положительная;

Области негативной динамики скорее всего объясняются нарушениями в лесах.



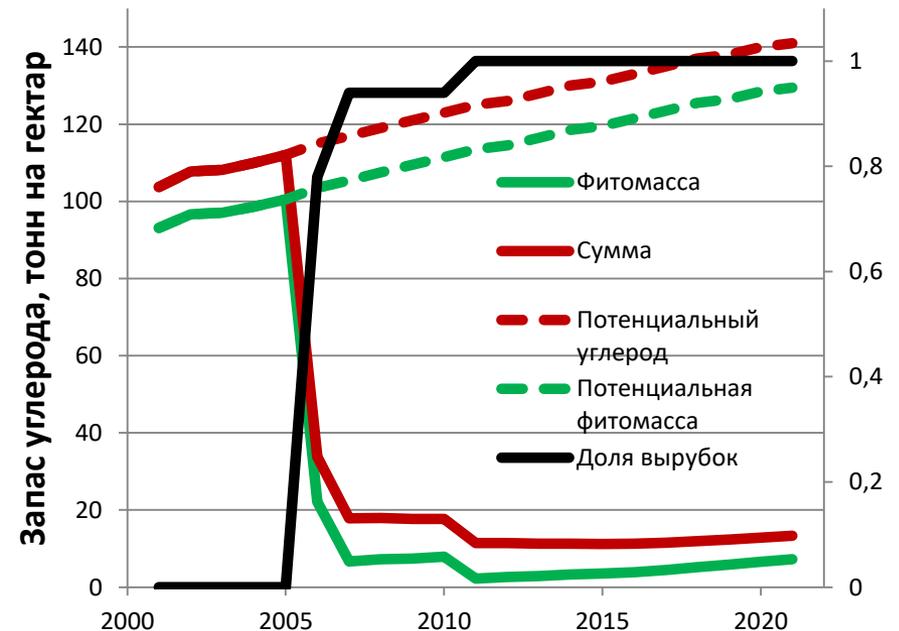
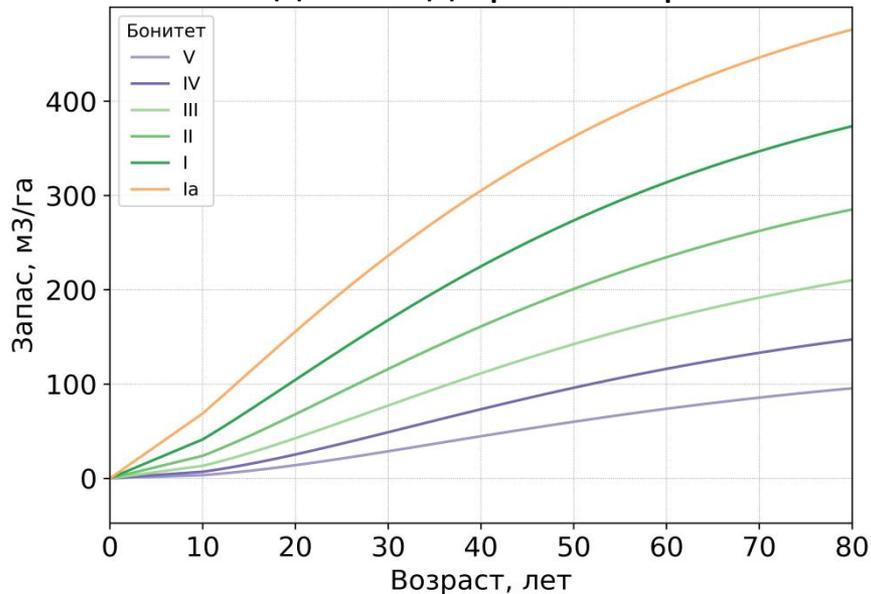
Потоковый и потенциальный вариант оценок

Можно реализовать еще два подхода к оценке углерода – «потенциальный» и «потоковый».

Потенциальный предполагает замену динамики запаса в поврежденных лесах на модельную оценку.

Потоковый – замену на модельную оценку для всех лесов России.

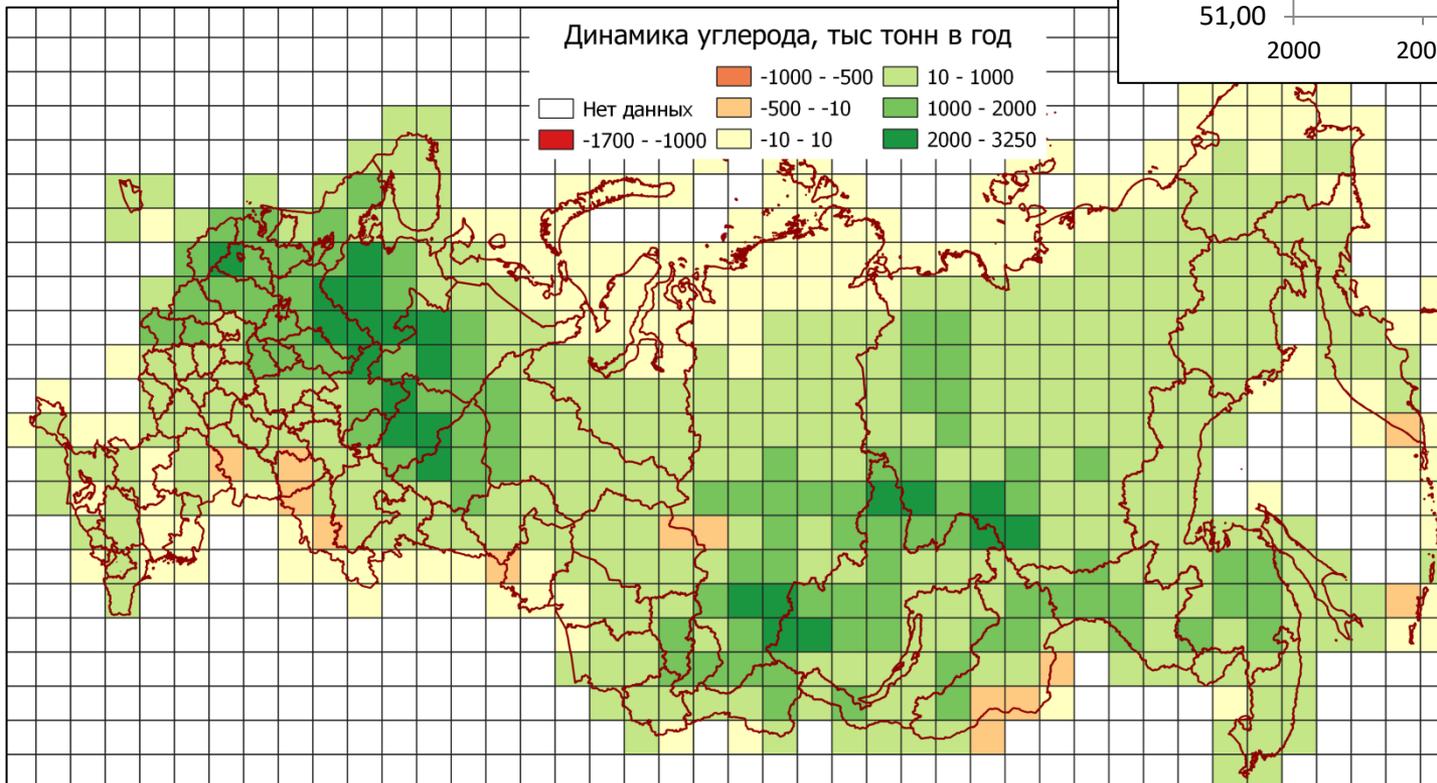
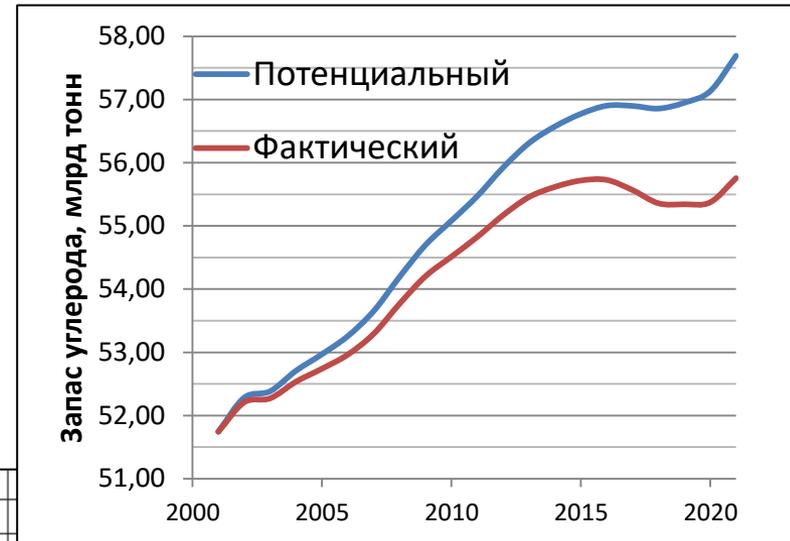
Модель хода роста березы



Анализ потенциального варианта оценок

Потенциальная оценка дает значительно более высокие оценки углерода;

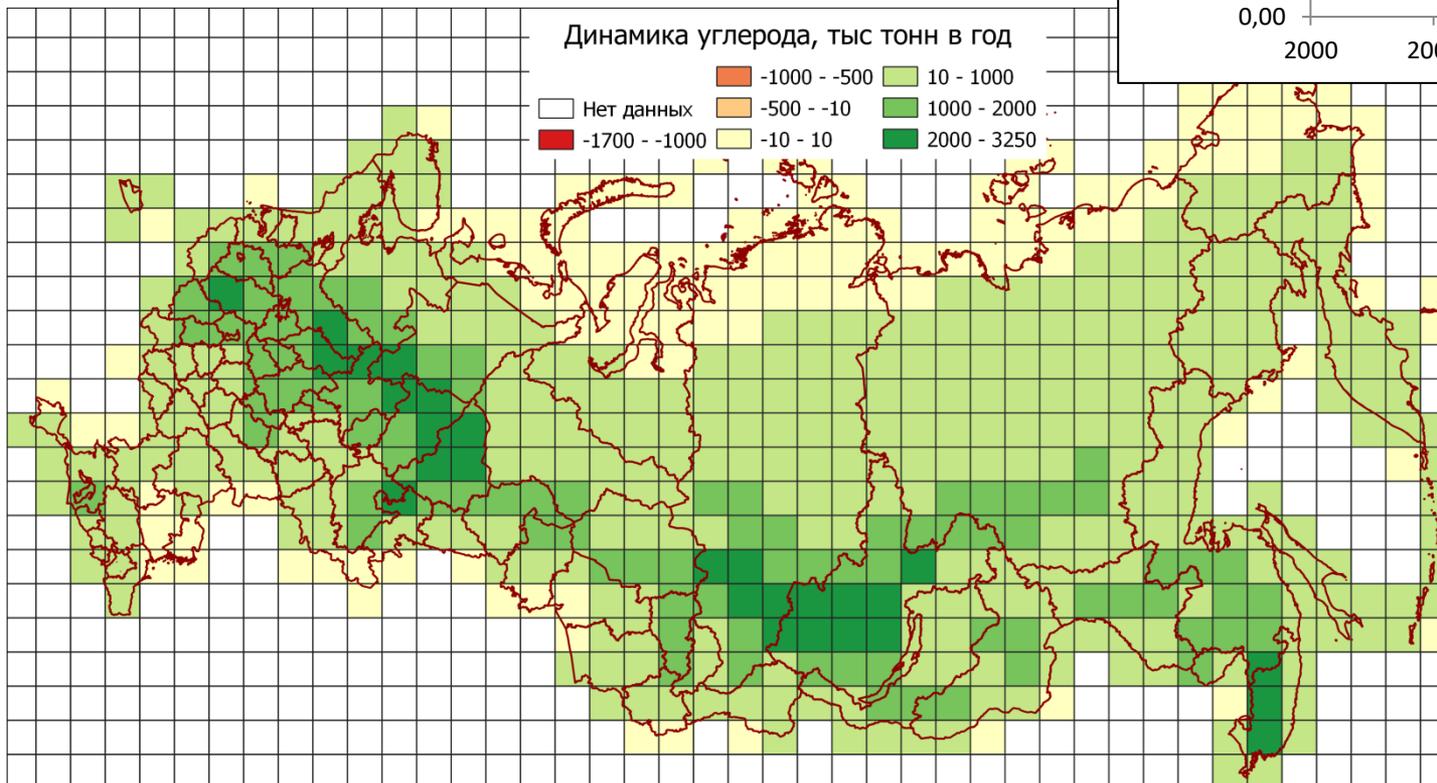
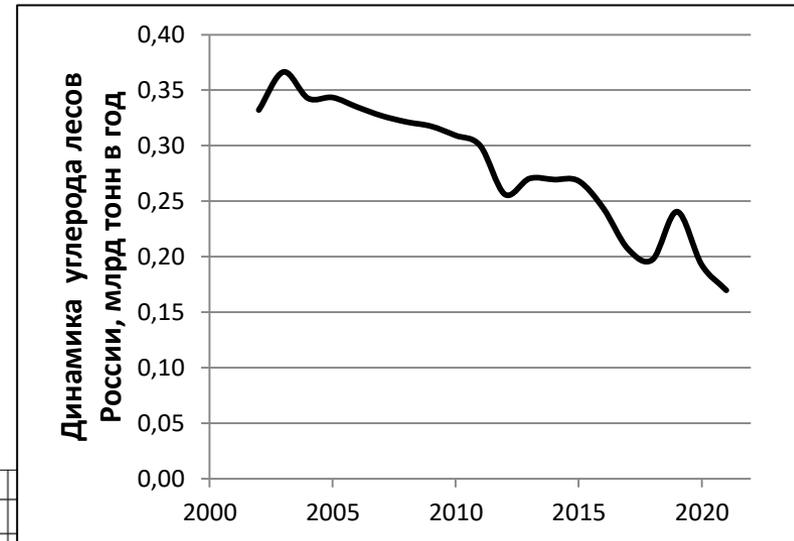
Практически исчезли области негативной динамики.



Анализ потокового варианта оценок

Потоковый вариант оценки показывает устойчивый, постепенно снижающийся прирост запаса углерода.

Основной прирост – в продуктивных областях с значительной площадью лесов.



Метод оценки неопределенности

Погрешность описанного метода оценки углерода определяется погрешностью входных данных и параметров моделей.

Для оценки погрешностей сложных систем – по сути «черного ящика» - часто используется метод Монте-Карло.

Для реализации Монте-Карло нужно:

- 1) Получить вероятностное распределение всех входных параметров;
- 2) Сгенерировать большой набор возможных значений параметров;
- 3) Подать все комбинации параметров на вход метода оценки углерода;
- 4) Полученное множество значений углерода дает вероятностное распределение значений углерода.

Учетные источники неопределенностей

Карта пород – неопределенность оценивалась по матрице перепутывания;

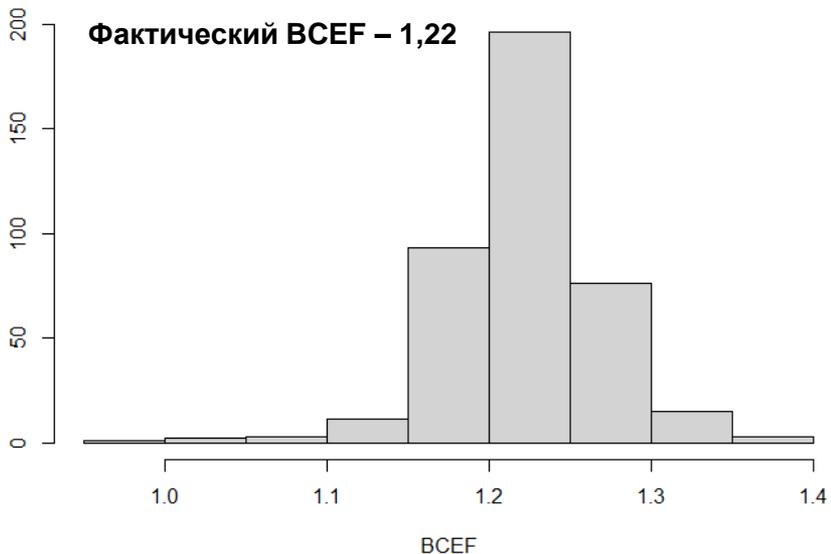
Коэффициенты ВСЕФ – неопределенности получены при построении регрессионных моделей;

Бонитет, запаса, полнота – с использованием Quantile Regression Forest, генерирующего для каждого пиксела вероятностное распределение;

Возраст – как и ранее на основе оценок породы, бонитета и запаса.

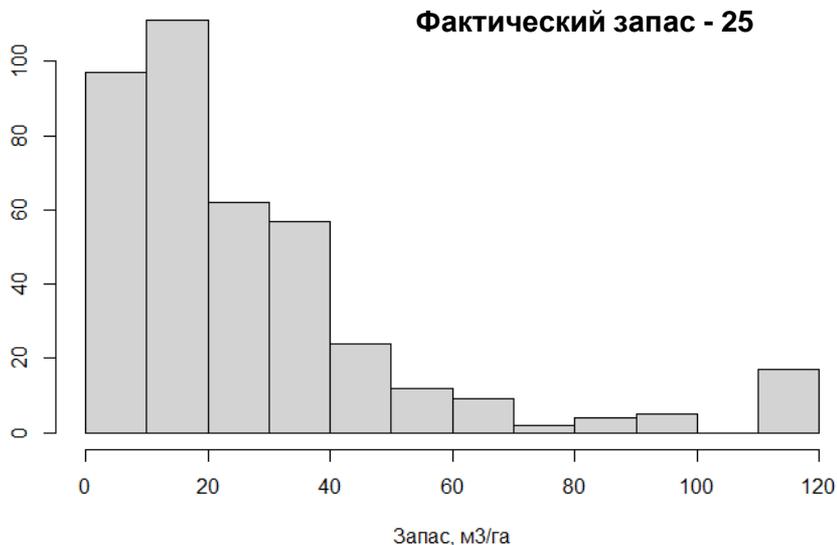
Пример вероятностных распределений

Вероятностное распределение конверсионного коэффициента

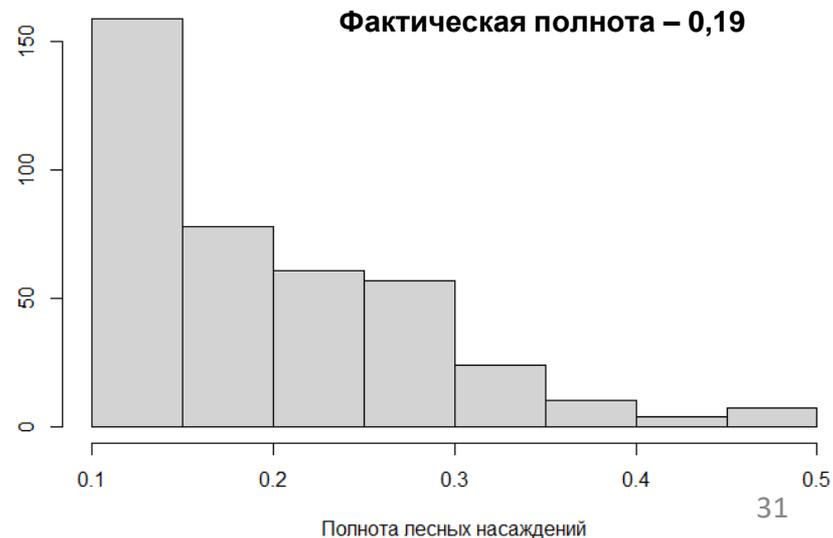


Распределение пород и бонитетов				
Порода	Доля %		Бонитет	Доля %
Сосна	3		V	1,5
Листв.	92,75		Va	44,3
Береза	2,25		Vб	54,2
Ель	0,75			
Кедр	1,25			

Вероятностное распределение запаса



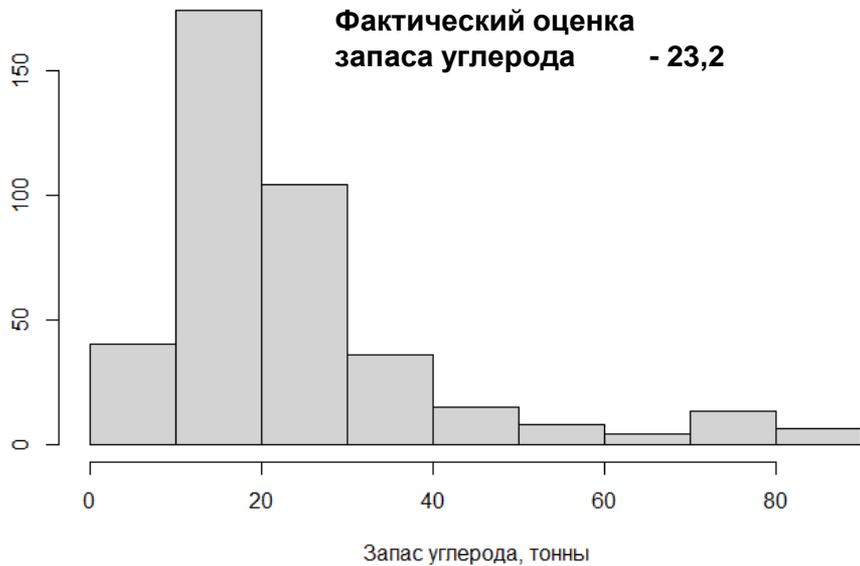
Вероятностное распределение полноты



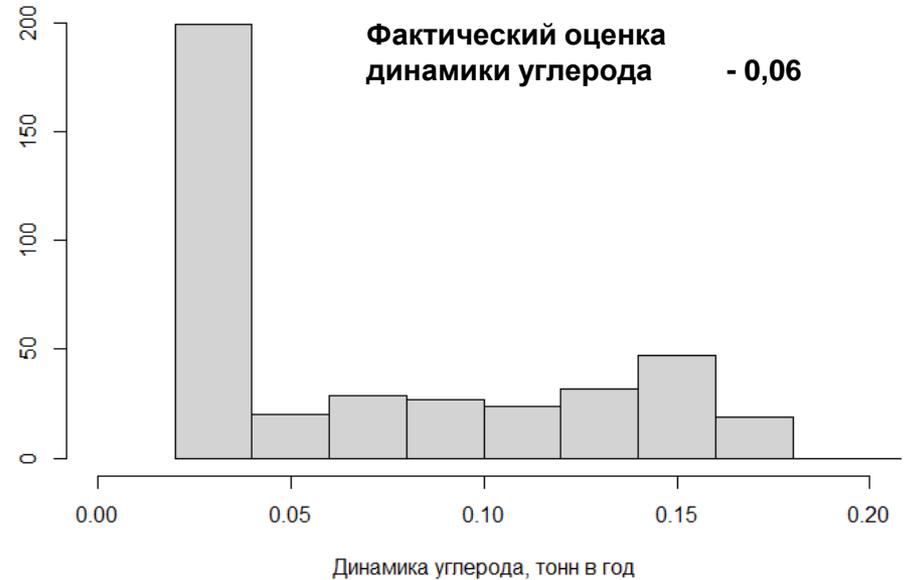
Результат Монте-Карло

Выполнение большого числа итераций с генерацией входных параметров и модельных коэффициентов по их распределением и выполнением оценки углерода позволяет получить вероятностное распределение запаса и динамики углерода.

Результат Монте-Карло - суммарный углерод



Результат Монте-Карло - динамика

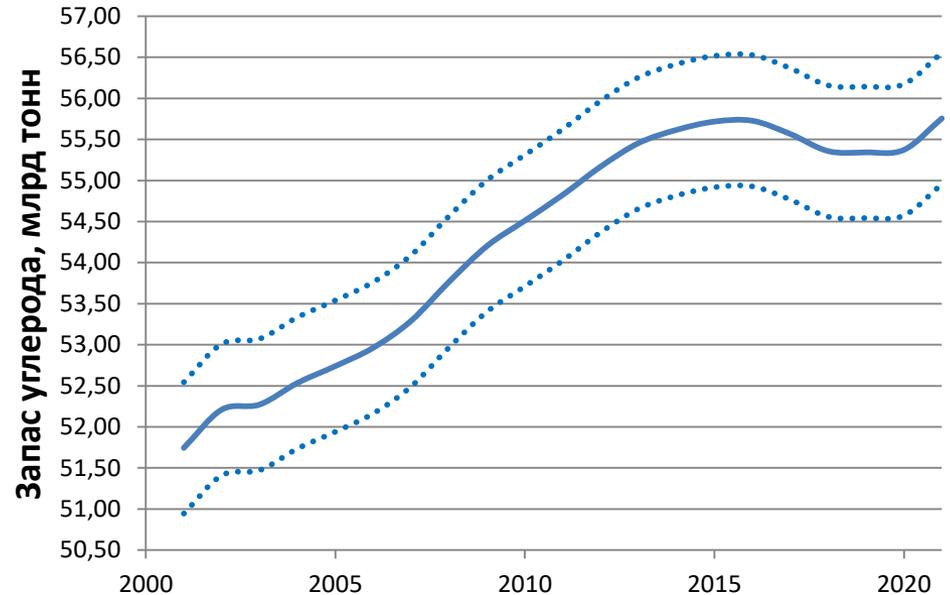


Оценка неопределенности

На уровне всей страны оценка неопределенностей показывает приемлемый уровень погрешности.

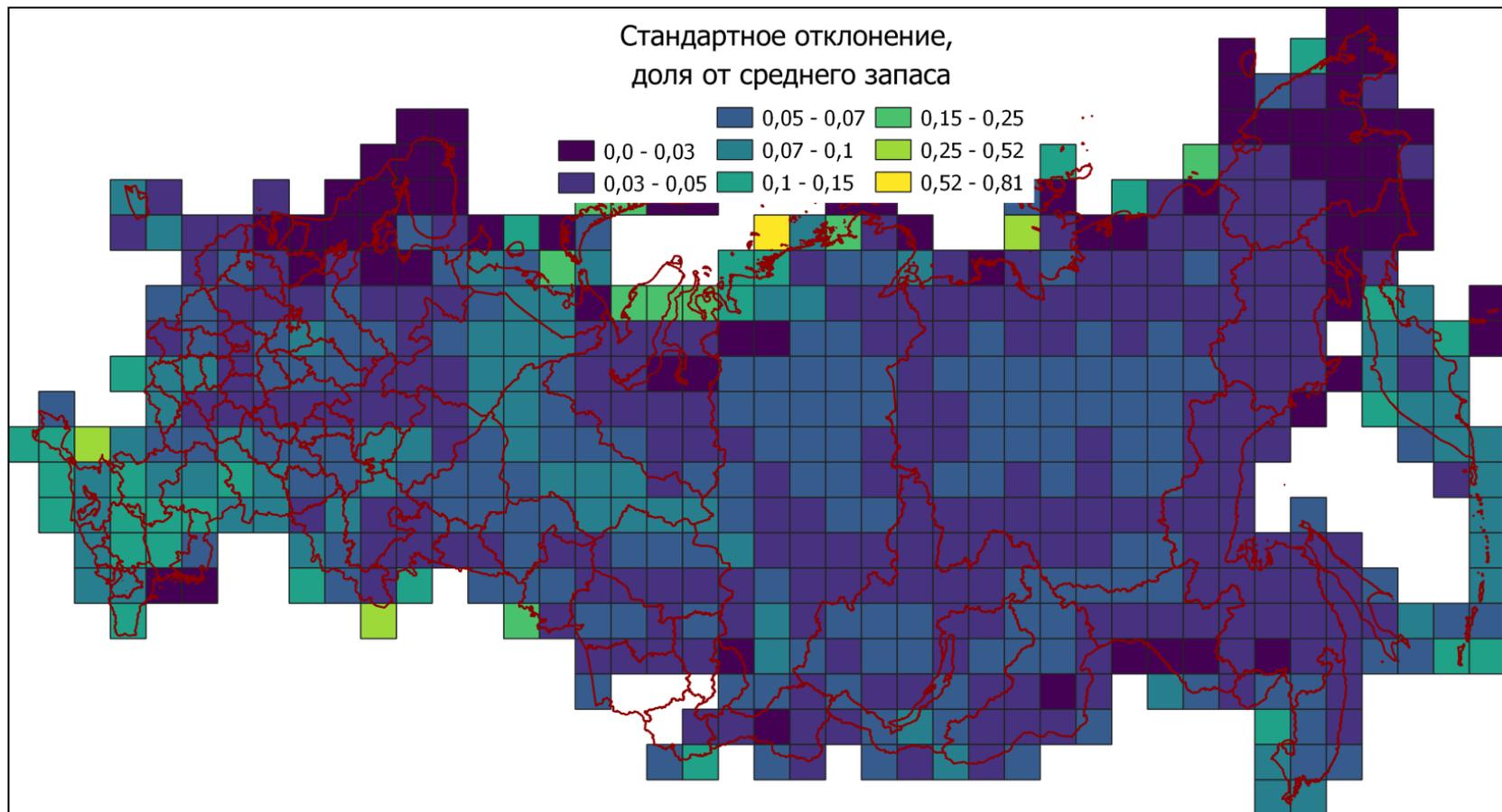
Россия	Запас, млрд т	Динамика, млн т
Среднее	56,2	153
Ср. кв. ошибка	1,6	12
Относительная ошибка	2,9%	7,7%
Ширина 95% интервала	9,0	63
Относительная ширина интервала	16,2%	41%

Динамика углерода +/- среднеквадратическая ошибка



Оценка неопределенности

На большей части территории страны нет значимых закономерностей распределения неопределенностей.



Ограничения оценки неопределенности

Метод не учитывает связь погрешностей соседних пикселей.

Анализ показывает, что такая связь существует на небольших областях и, предположительно, может игнорироваться.

Также не учитывается связь погрешностей разных параметров.

Получение большого объема достоверных наземных данных позволило бы улучшить оценки погрешностей параметров и улучшить оценки неопределенностей.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!