

Калибровка ДЗЗ оценки экосистемного дыхания на основе измерений эколого-климатических станций по лесным и болотным экосистемам России

Н.В. Шабанов^а, О.А. Куричева^б, С.А. Барталев^а, Ю.А. Курбатова^б, В.В. Мамкин^б,
А.В. Варлагин^б, С.В. Загирова^в, В.И. Зырянов^г, Е.А. Дюкарев^д, Т.Х. Максимов^е,
М.А. Мигловец^в, А.В. Панов^г, Р.Е. Петров^е, А.С. Прокушкин^г

а) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

б) Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

в) Институт биологии Коми научного центра УО РАН, Сыктывкар, Россия

г) Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

д) Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

*е) Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН – обособленное
подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, Россия*

СПДЗ-2025, ИКИ РАН, Москва, Россия
12 ноября 2025 г.

Цель работы

Создание атоматизированной системы расчета компонент баланса углерода в экосистемах (GPP/Reco/NEE) на основе ДЗЗ технологий для всей территории России.

Подход

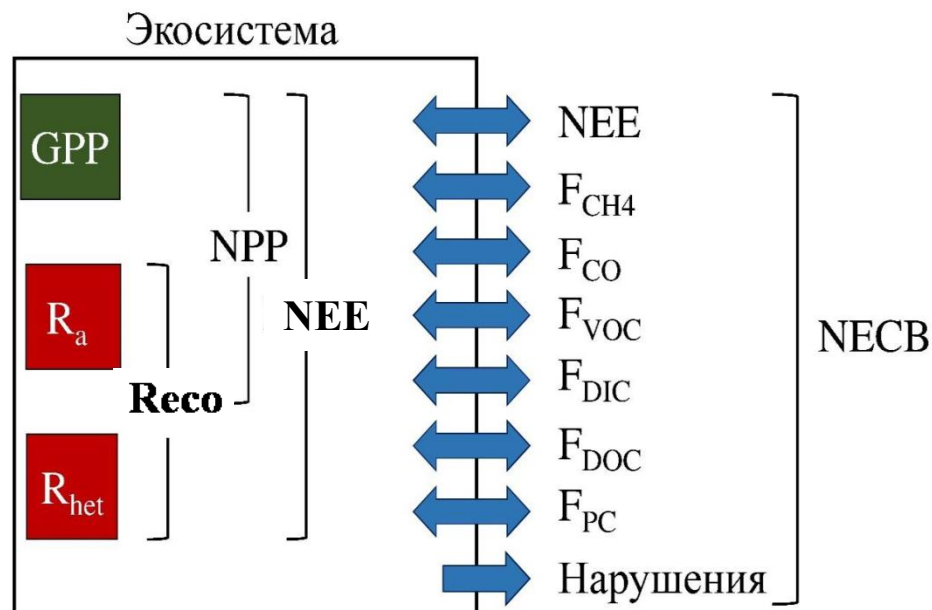
Расчет поглощения углерода технологиями ДЗЗ является достаточно хорошо разработанной задачей. Мы адаптировали NASA MOD17 алгоритм для расчета GPP на основе потоковой обработки ИКИ для прибора MODIS [СПДЗ-2024].

Расчет экосистемного дыхания слабо разработан. Мы разработали алгоритм расчета Reco на основе трех эмпирических регрессионных моделей. Эти модели параметризованы с использованием данных с эколого-климатических станций [этот доклад].

Актуальность

Расчет потоков углерода на основе ДЗЗ является единственным вариантом для обширных территорий России. Временные ряды являются уникальным показателем 'здоровья' экосистем в процессе фотосинтеза. Оценка и анализ временных рядов нетто поглощения является важной государственной задачей в рамках Парижского соглашения (2015 г) о контроле выбросов углерода.

Ключевые переменные баланса потоков углерода

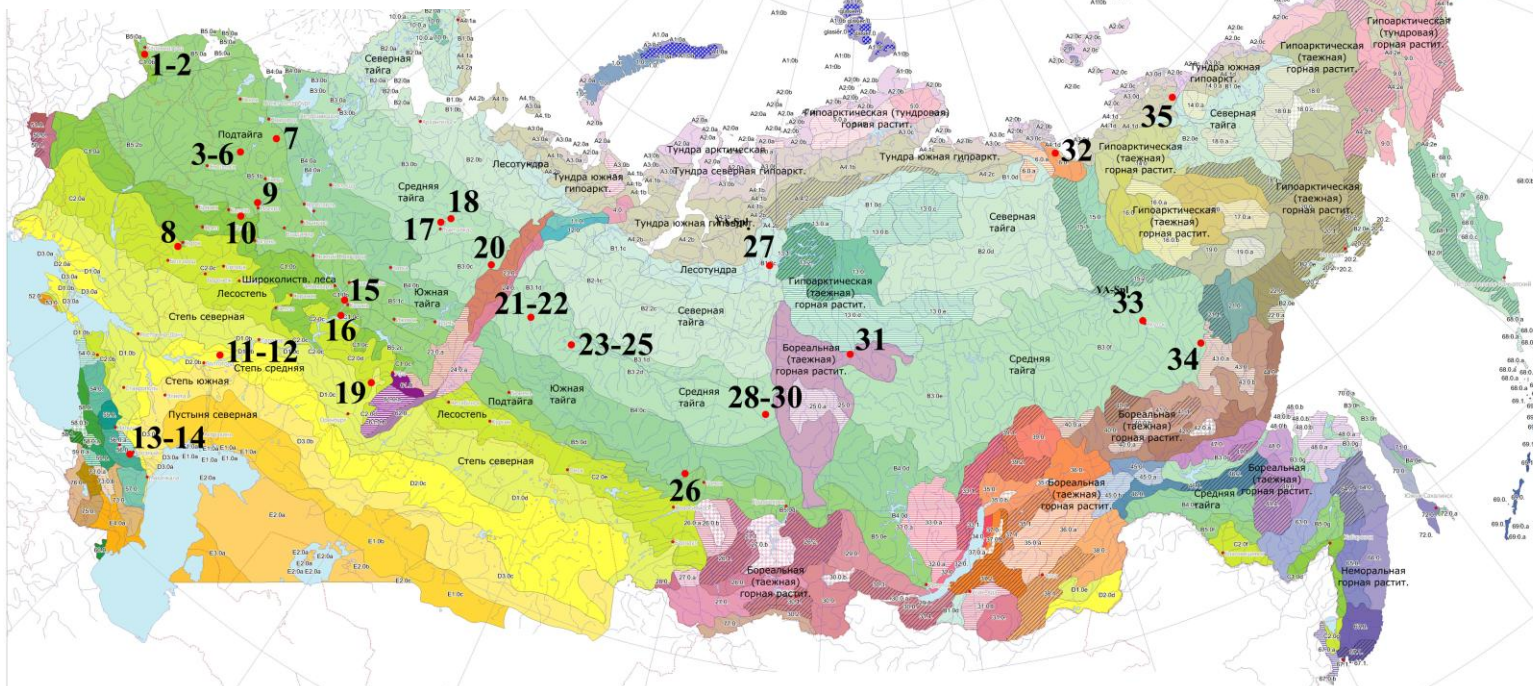


(из Курбатова и др., СПДЗ-2023)

- GPP – валовая первичная продукция (количество С, поглощенное экосистемой в ходе фотосинтеза)
- R_{eco} – полное дыхание экосистемы (количество С, выпущенное экосистемой в процессе дыхания)
 $R_{eco} = R_a + R_h$
- R_a – автотрофное дыхание (дыхание растений включая корни)
 $R_a = MR + GR$ – дыхание поддержания + дыхание роста
- R_h – гетеротрофное дыхание (дыхание микроорганизмов почвы)
- NPP – чистая первичная продукция (нетто поглощение С растениями)
 $NPP = GPP - R_a$
- NEE – чистый экосистемный обмен – баланс с атмосферой экосистемных потоков CO_2
 $NEE = -(GPP - R_a - R_h) = R_{eco} - GPP$

Пространственное распределение эколого-климатических станции сети RuFlux

Карта: типы и зоны поясности растительности России и сопредельных территорий. Под. ред. Г.Н. Огуреевой. Москва, «Экор», 1999 г.



35 станций !!!

Калининградская обл.
1 – KA-Vit 2 – KA-Vi2

Тверская область
3 – TV-Fyo 5 – TV-Fy3
4 – TV-Fy2 6 – TV-Fy4

Новгородская обл.
7 – NO-LTa

Курская обл.
8 – KU-KBS

Московская обл.
9 – MO-Chf 10 – MO-Pus

Волгоградская обл.
11 – VG-KaS 12 – VG-KaP

Республика Чечня
13 – CR-Chr 14 – CR-Frm

Республика Татарстан
15 – TA-Obs 16 – TA-Sar

Республика Коми
17 – KO-UPo 20 – KO-Yak
18 – KO-Lya

Республика Башкортостан
19 – BA-Kur


Ханты-Мансийский АО
21 – KM-KOz 24 – KM-Mu2
22 – KM-KO2 25 – KM-Mu3
23 – KM-Muh

Томская область
26 – TO-Plt

Красноярский край
27 – KR-Iga 30 – KR-Zo3
28 – KR-Zo1 31 – KR-Tur
29 – KR-Zo2

Республика Саха (Якутия)
32 – YA-Tik 34 – Ya-Elg
33 – YA-SPI 35 – Ya-Ckd

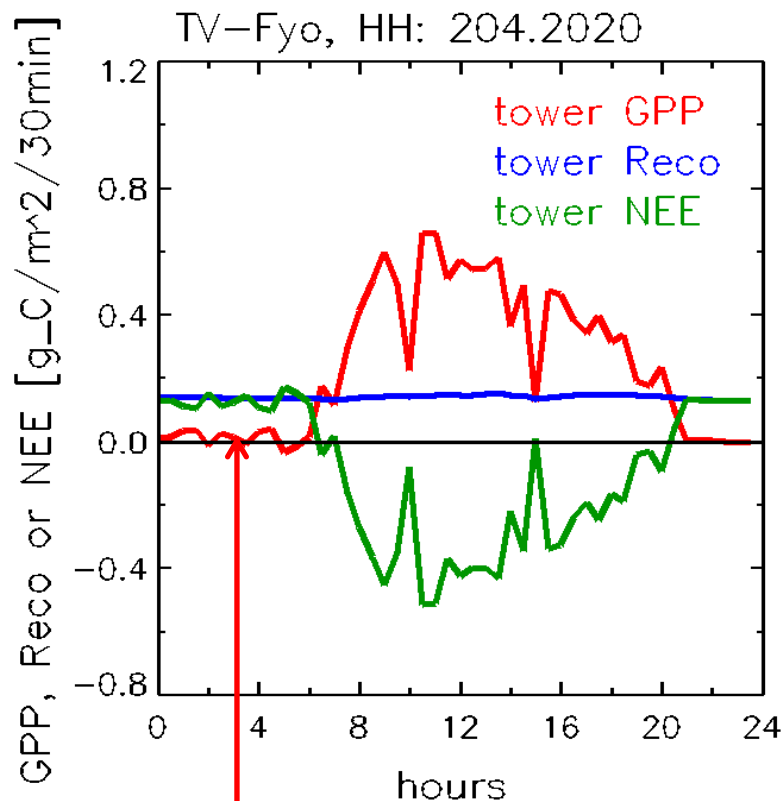
Данные RuFlux, использованные в работе

- 
1. Федоровское (Тверская обл., заболоченный ельник с примесью березы, 1998-2020)
 2. Федоровское-2 (Тверская обл., неморальный ельник с примесью клена, вяза, осины и березы, 2015-2020)
 3. Ляли (Республика Коми, ельник черничный, 2020-2023)
 4. Якша (Республика Коми, сосняк бруснично-лишайниковый, 2021-2023)
 5. Мухрино-3 (Ханты-Мансийский АО, темнохвойно-осиновый лес с березой, 2023-2024)
 6. Спасская Падь (Якутия, лиственничник, 2004-2013)
 7. Эльгэйи (Якутия, лиственничник, 2010-2018)
 8. Тура (Красноярский край, лиственничник кустарничковый, 2023)
 9. Федоровское-4 (Тверская обл., верховое болото, 2015-2022, 2024)
 10. Усть-Пожег (Республика Коми, мезоолиготрофное болото, 2012,2013,2017)
 11. Игарка (Красноярский край, плоскобугристое болото, 2023)
 12. Мухрино (Ханты-Мансийский АО, олиготрофное сфагновое болото, 2021-2024)
 13. Мухрино-2 (Ханты-Мансийский АО, сосново-кустарничково-сфагновое болото, 2024)
 14. Плотниково (Томская область, олиготрофный озерковый болотный комплекс, 2022-2024)

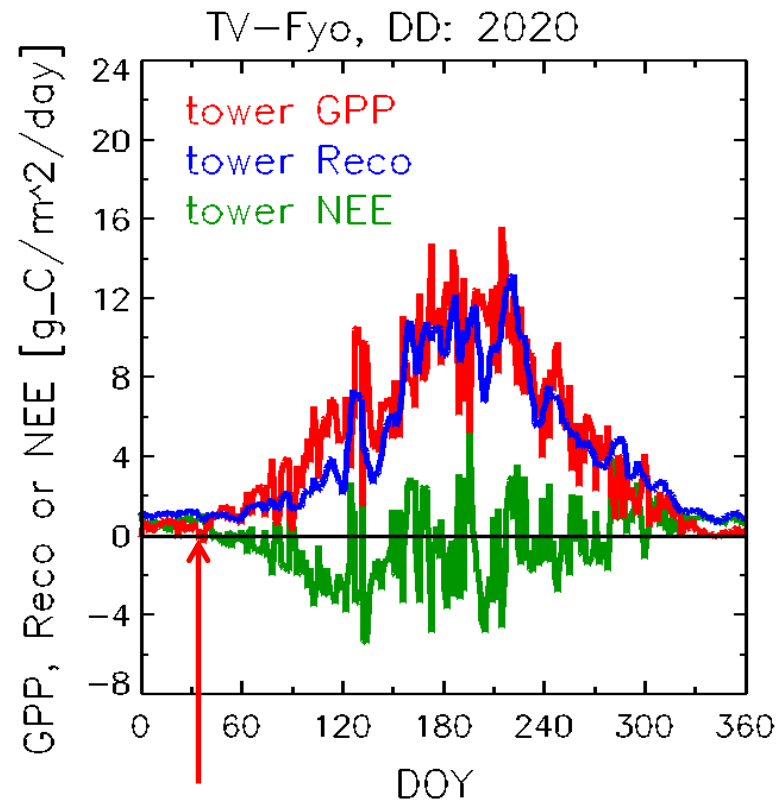
Дополнительно были использованы данные сети FLUXNET по ENF (10 экс) и DBF (13 экс) для Европы, США и Канады



Варибельность потоков углерода

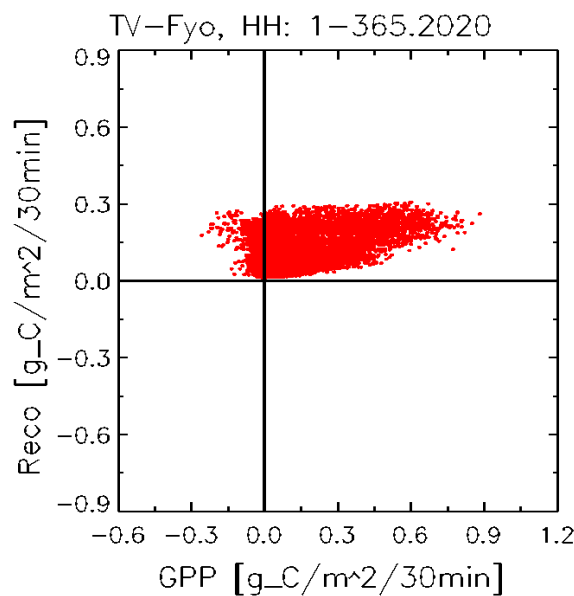


Ночью поглощение отсутствует

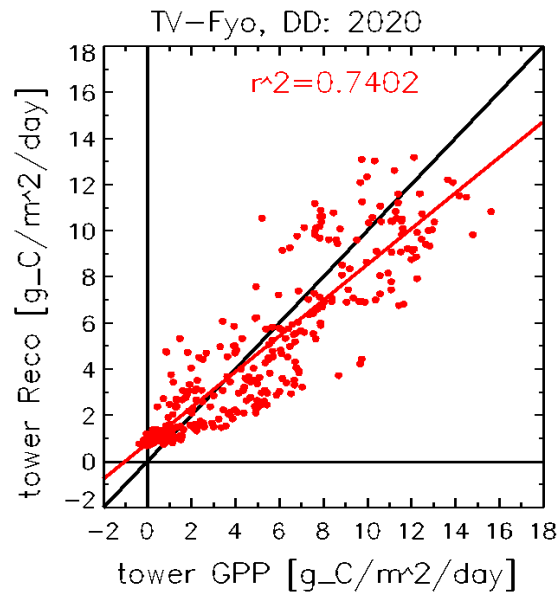


Зимой заторможено как поглощение, так и дыхание

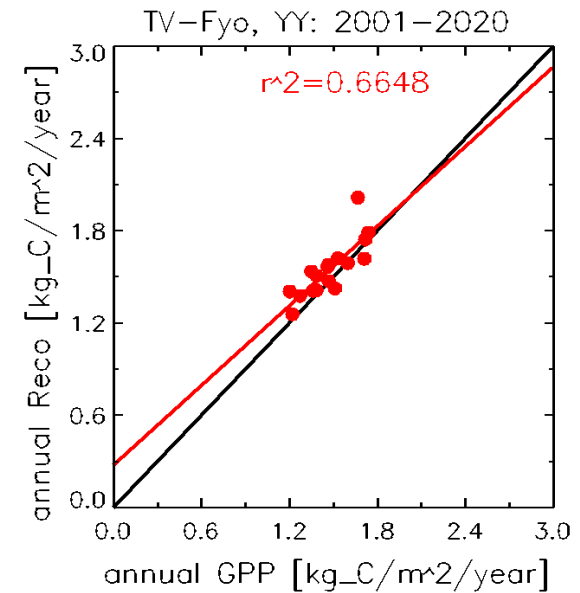
- Существует как суточный так и сезонный циклы потоков углерода. Однако на суточном масштабе дыхание инертно (слабо меняется). Вариабельность Reco возникает на сезонном масштабе.
- Суточный цикл NEE используется для разделения на GPP + Reco на основе **ночного** (Reichstein et al., 2005) и **дневного** (Laslop et al 2010) алгоритмов.
- Сезонный цикл был использован в данной работе для решения **обратной задачи** - на основе GPP получить два других потока (Reco и NEE).



HH



DD

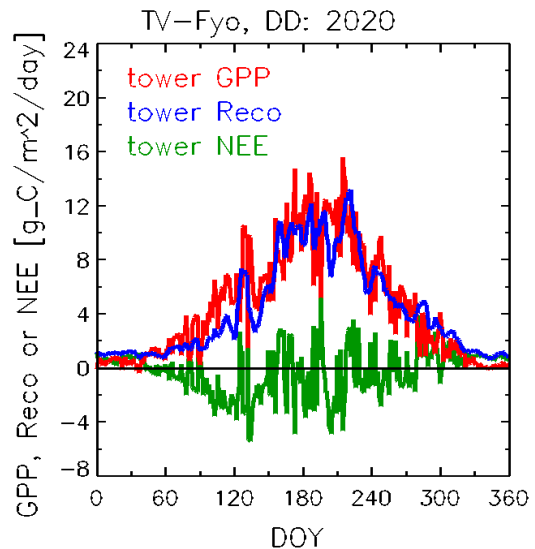


YY

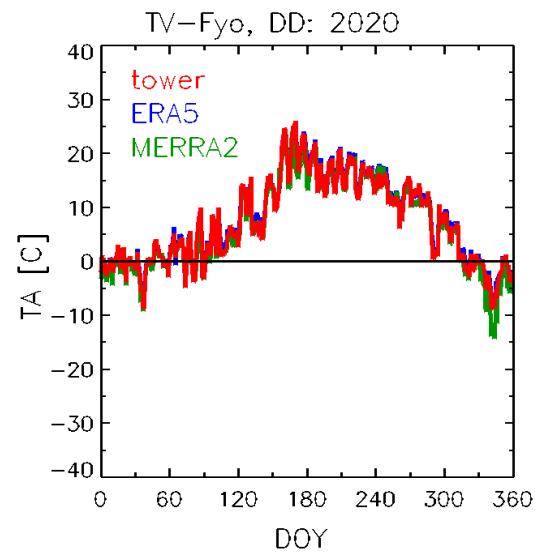
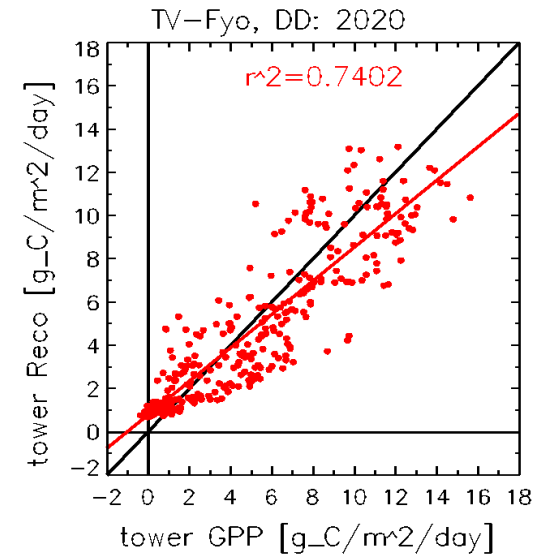
увеличение временного интервала

- На суточном интервале корреляция между RECO и GPP зашумлена ввиду инертности Reco.
- Корреляция возникает на сезонном и межгодовом уровне
- Физический смысл корреляции прост: экосистема стремится к балансу- чем больше она потребляет, тем больше должна удалять.
- Фундаментальный вопрос: чем обусловлен баланс на годовом уровне, $\text{GPP} > < \text{Reco}$?!

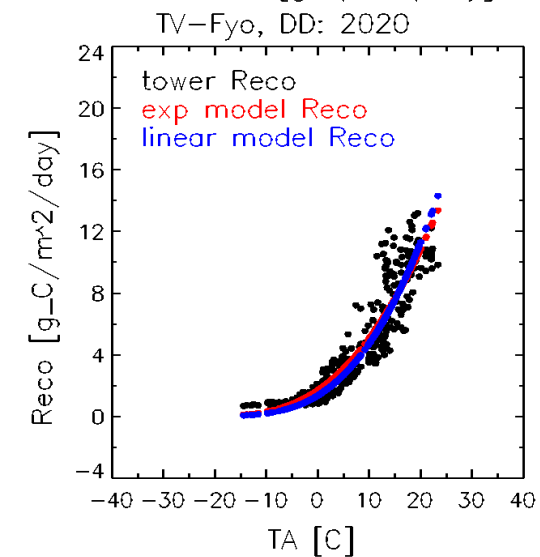
Эмпирические законы- два ключевых предиктора Resco



Предиктор #1
→
GPP



Предиктор #2
→
TA



Сам по себе профиль предиктора недостаточен для оценки Resco, он не фиксирует амплитуду. В нашем подходе амплитуда Resco привязана к годовому GPP.

Три модели экосистемного дыхания Reco

RECO1: линейная по GPP модель (1D линейная регрессия)

$$\text{Reco}(\text{GPP}) = \alpha \cdot \text{GPP} + \beta.$$

RECO2: Экспоненциальная по T модель Lloyd & Taylor (1994) (1D нелинейная регрессия)

$$\text{Reco}(T) = R_{\text{ref}} \cdot \exp \left[-E_0 \left(\frac{1}{61.02} - \frac{1}{T + 46.02} \right) \right],$$

либо линейная версия

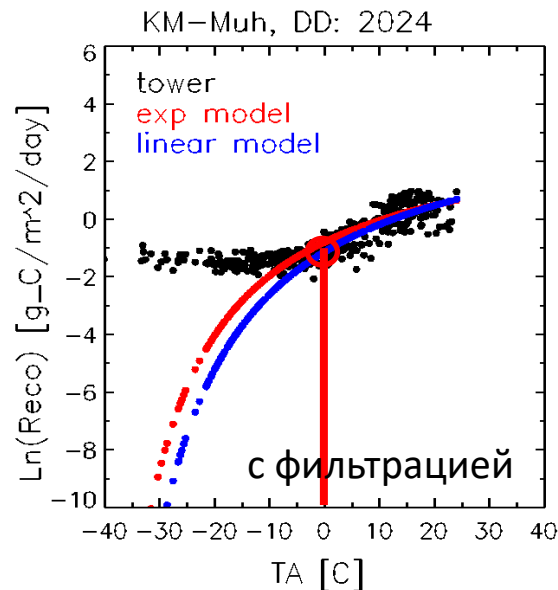
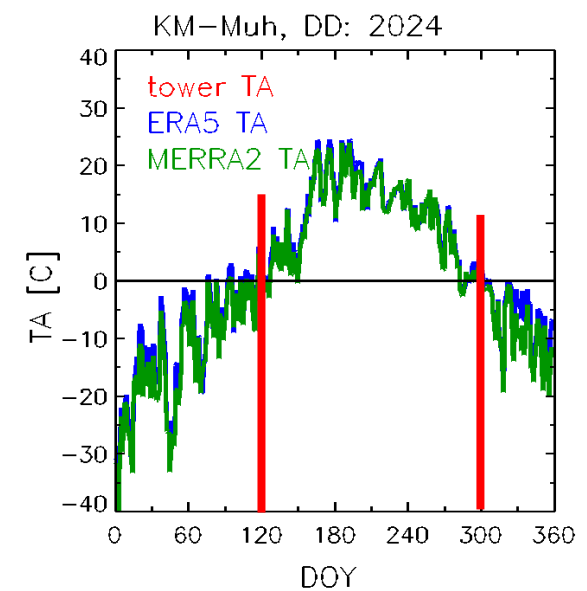
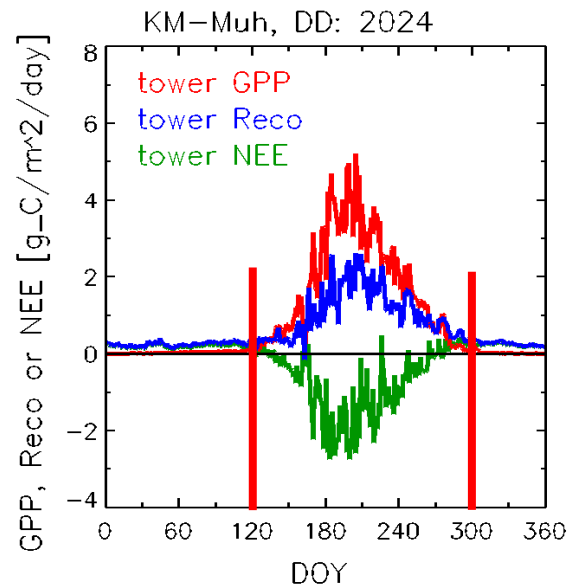
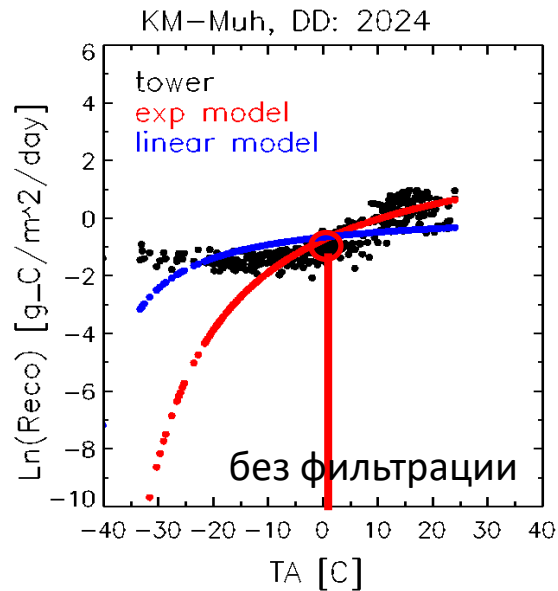
$$\ln[\text{Reco}(T)] = -E_0 \left(\frac{1}{61.02} - \frac{1}{T + 46.02} \right) + \ln[R_{\text{ref}}].$$

RECO3: Комбинация моделей 1+2, Gao et al (2015) (2D нелинейная регрессия)

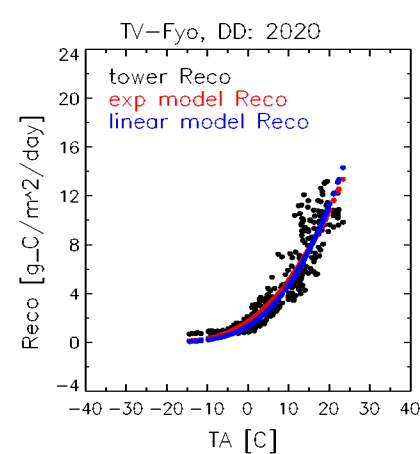
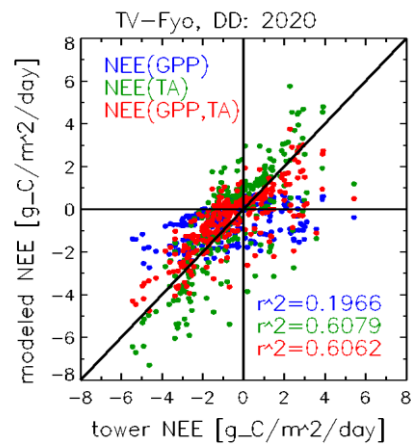
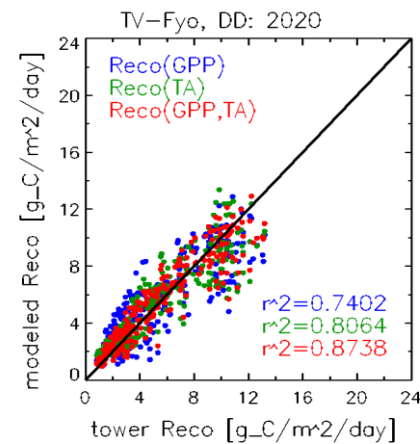
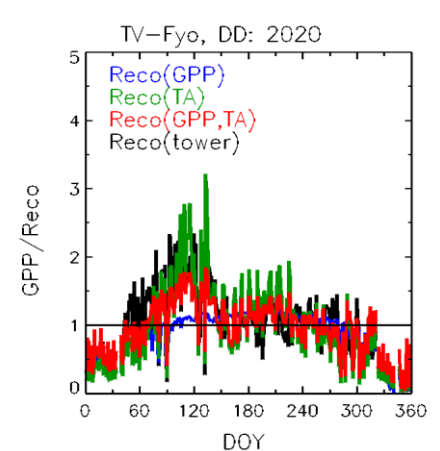
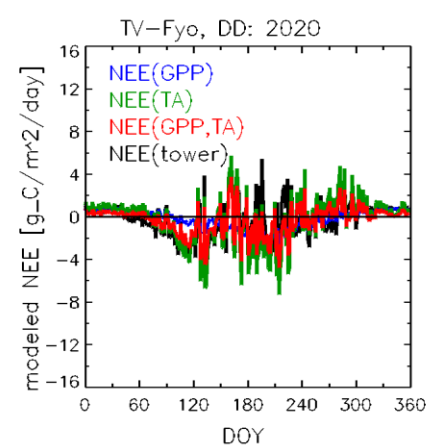
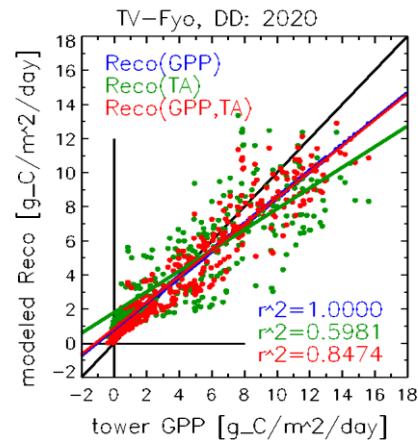
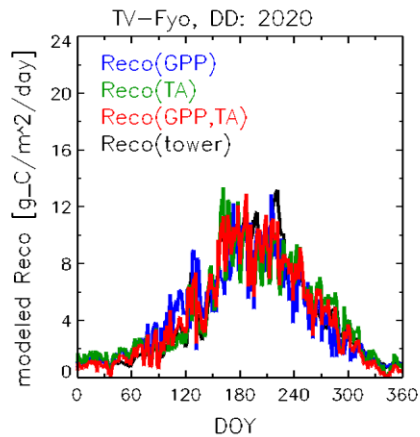
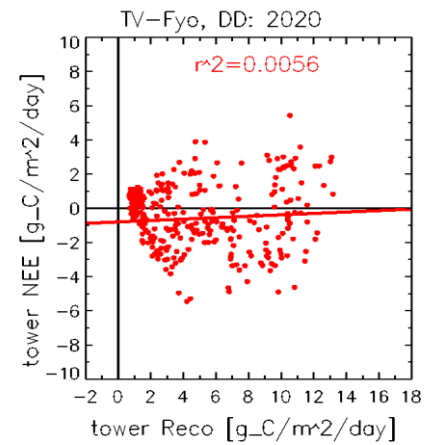
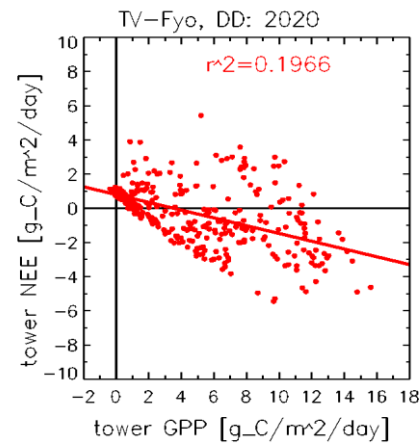
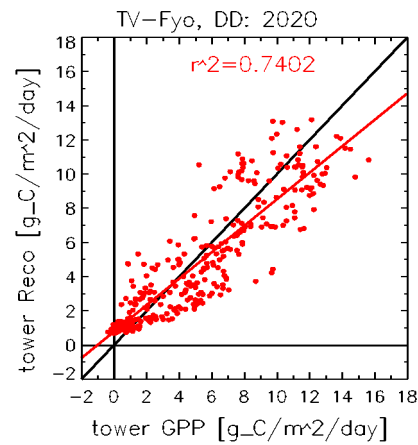
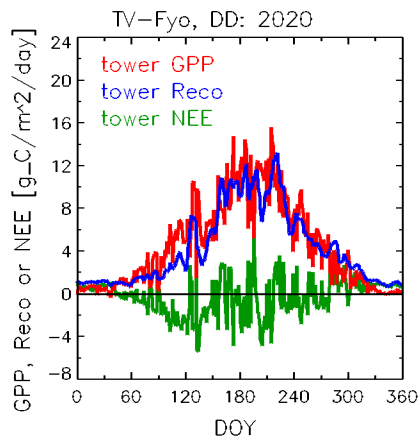
$$\text{Reco}(\text{GPP}, T) = \underbrace{\alpha \cdot \text{GPP}}_{\text{автотрофная часть}} + \underbrace{R_{\text{ref}} \cdot \exp \left[-E_0 \left(\frac{1}{61.02} - \frac{1}{T + 46.02} \right) \right]}_{\text{гетеротрофная часть}}.$$

- Модели применены к годовому циклу суточных данных (строго без пропусков).
- Регрессии рассчитаны на основе алгоритма *Levenberg-Marquardt*.
- В качестве температуры использованы данные реанализа NASA MERRA2.

Точка излома температурной зависимости модели RECO2

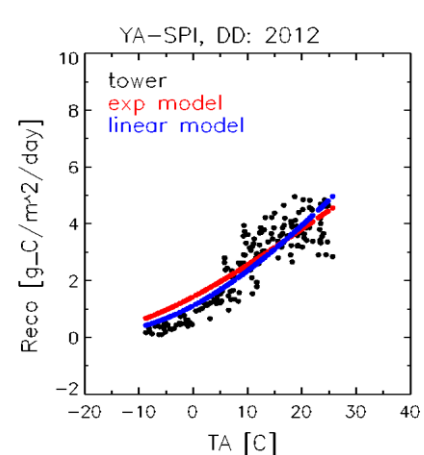
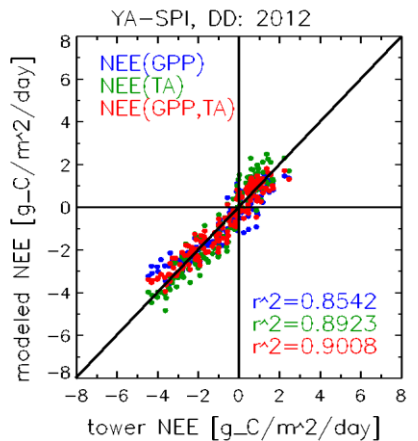
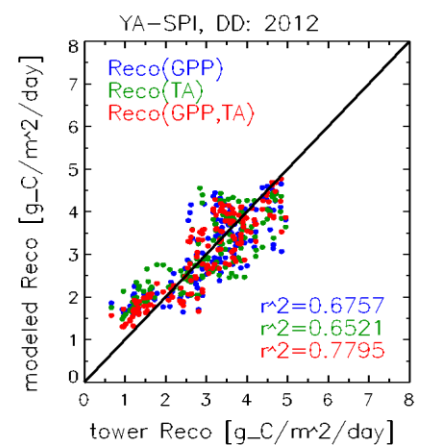
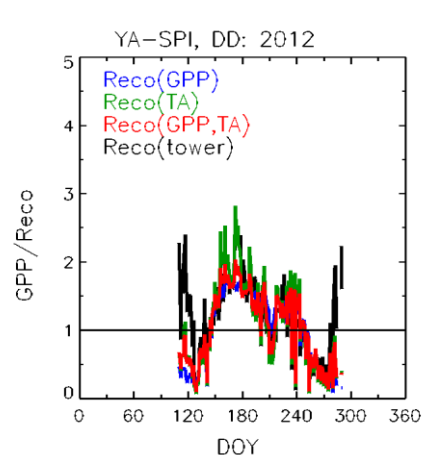
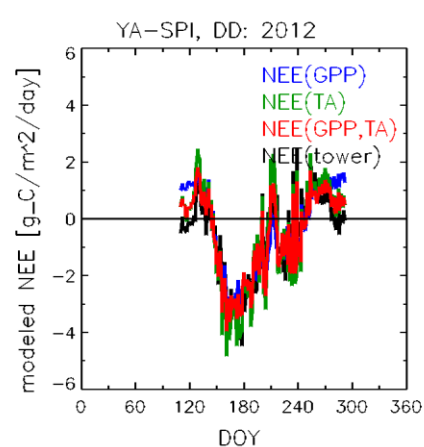
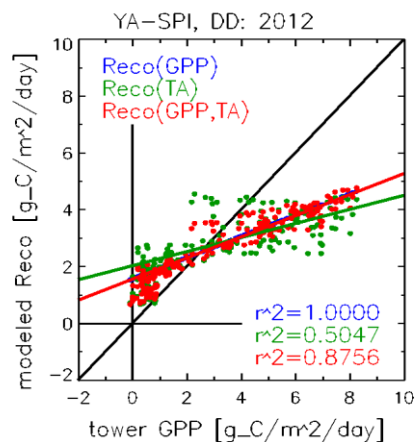
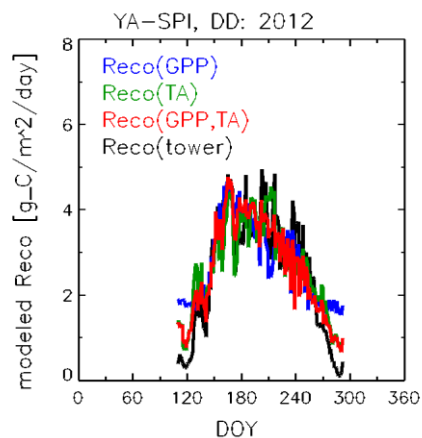
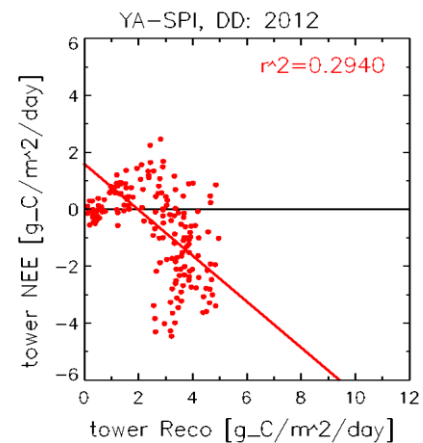
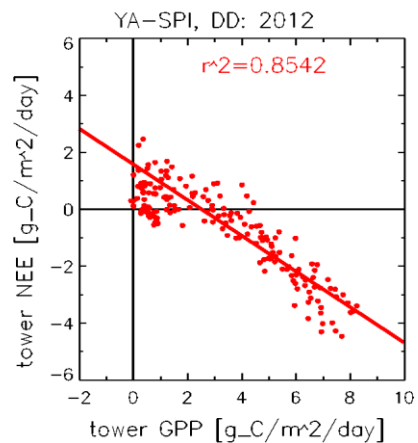
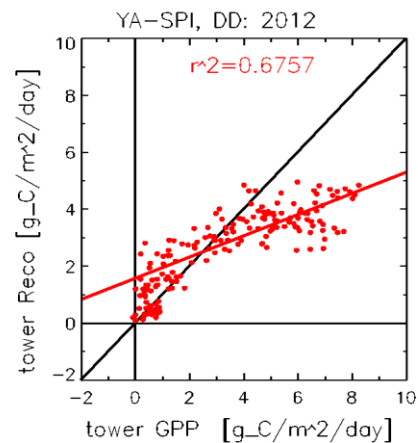
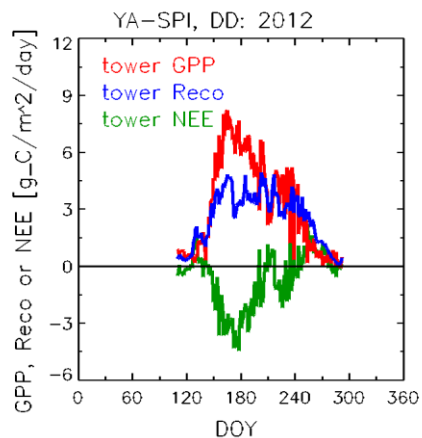


- Сезонный ход Reco можно довольно точно аппроксимировать моделью RECO2 с фиксированным набором параметров, но только для интервала $\text{TA} > 0$.
- При $\text{TA} < 0$ фотосинтез и дыхание замедлены. Нужна иная аппроксимация. Какая?
- Необходимость регуляризации регрессии (фильтрации по TA) заметна уже ввиду того, что экспоненциальная и линеаризованные формы модели RECO2 расходятся в аппроксимации.



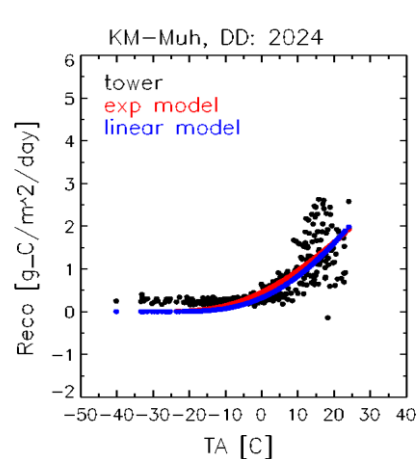
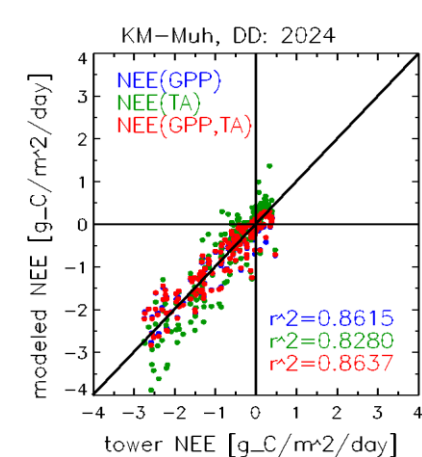
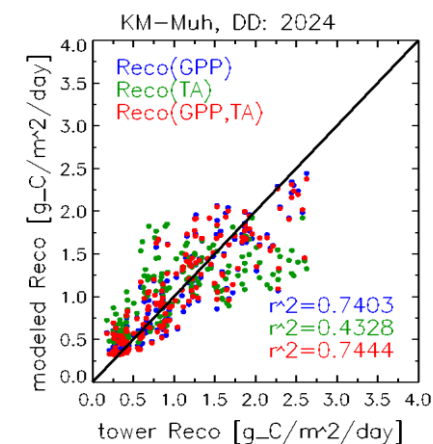
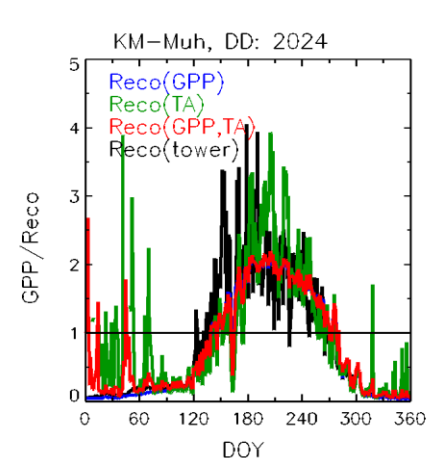
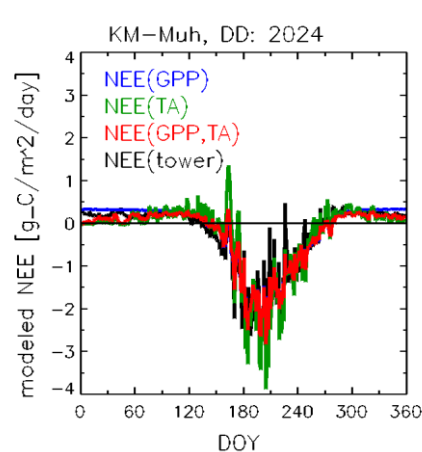
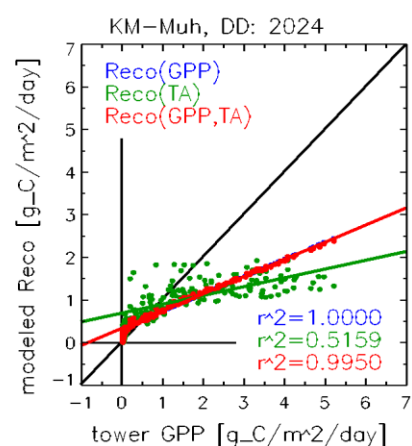
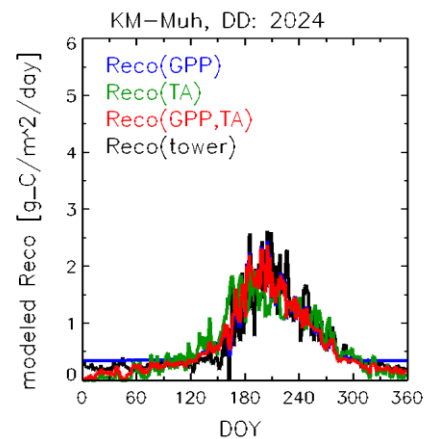
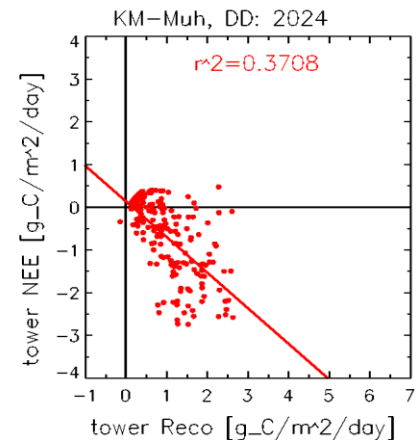
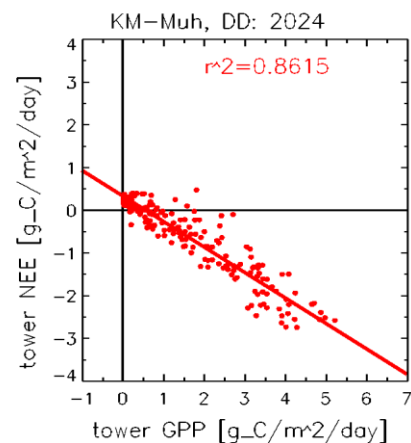
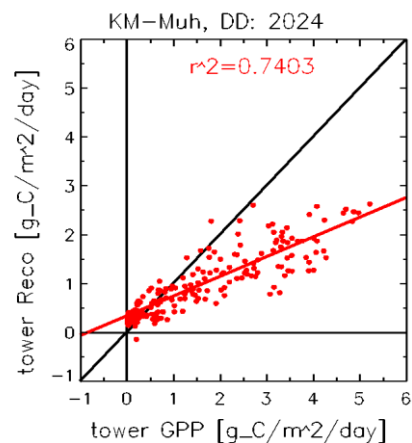
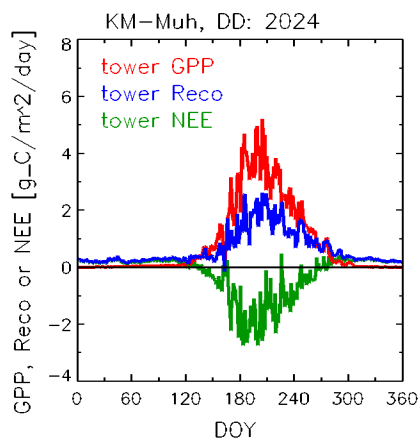
Пример
аппроксимации
для TV-Fyo

ENF



Пример
аппроксимации
для Ya-SPI

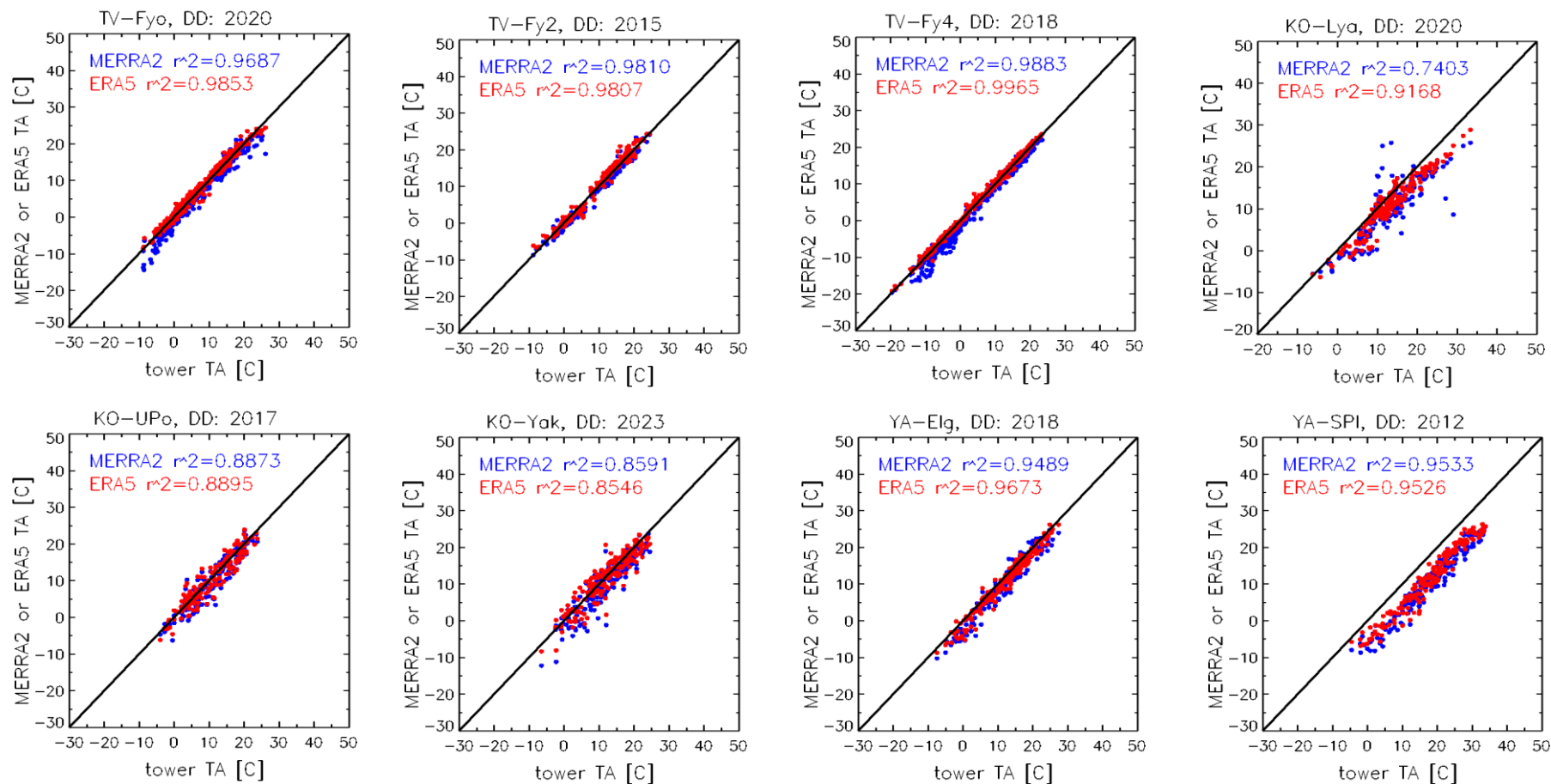
DNF



Пример
аппроксимации
для KM-Muh

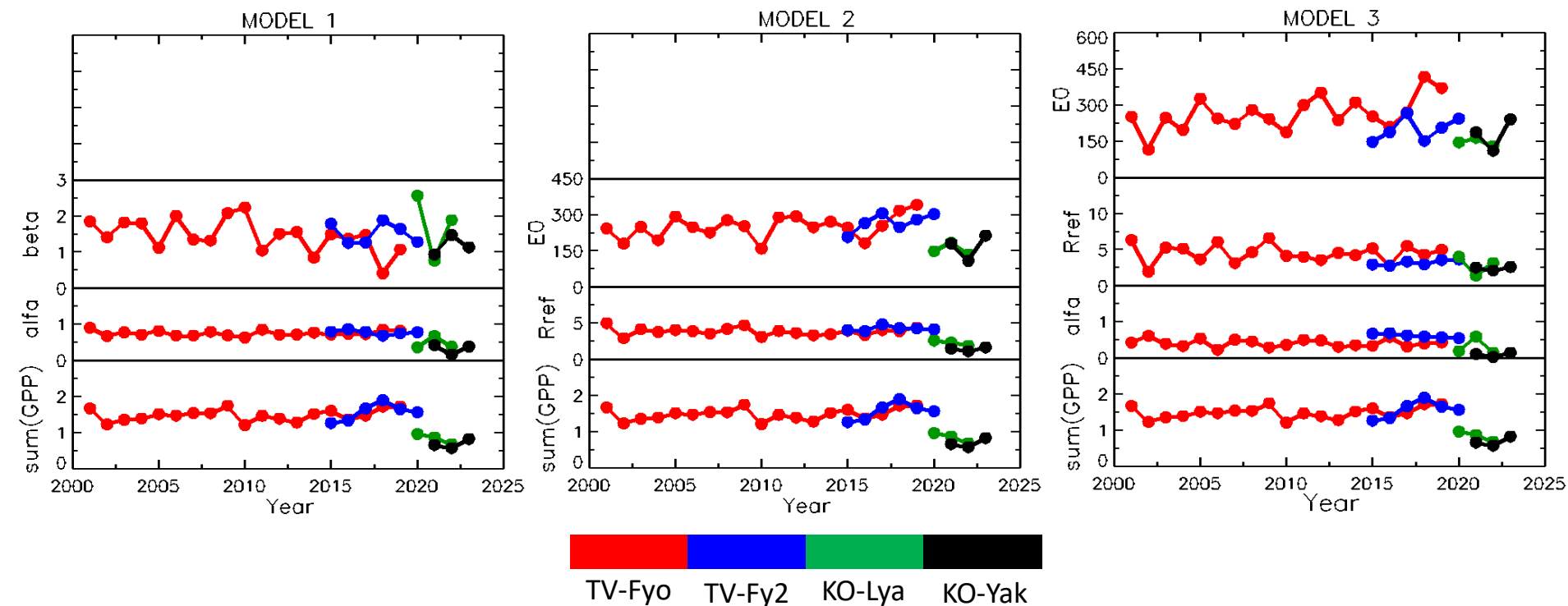
WET

Сравнение среднесуточной температуры из реанализа MERRA2/ERA5 и станций



- Для многих станций данные по наземной температуре отсутствуют либо заменены на реанализ.
- На основе анализа доступных наземных измерений- точность реанализа достаточна для реализации алгоритма RECO2 и RECO3.

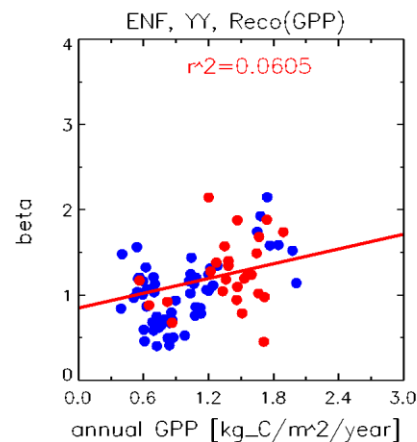
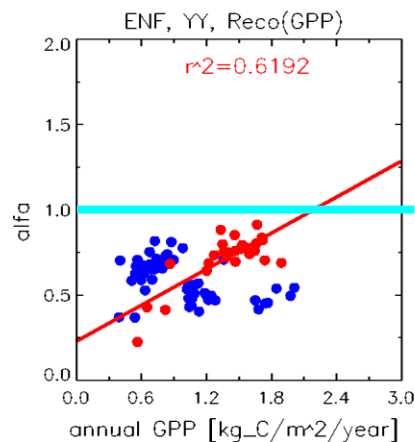
Временная и пространственная вариабельность коэффициентов моделей Reso



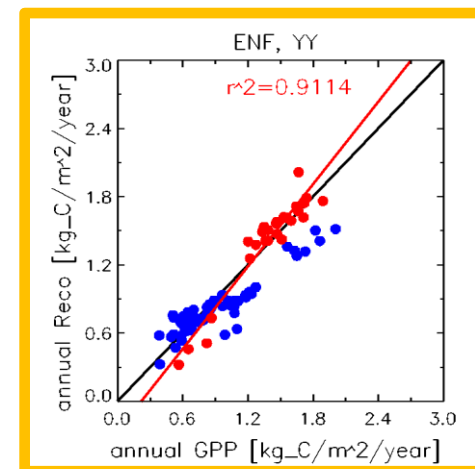
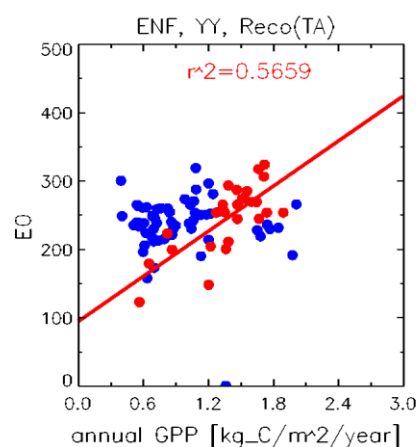
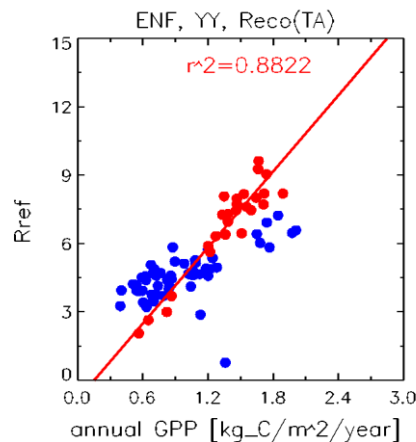
- Коэффициенты моделей Reso были рассчитаны на основе аппроксимации данных станции за целый год наблюдений.
- Эти коэффициенты варьируются от года к году и от станции к станции. **Усреднить их нельзя, т.к. это нарушит вариабельность, в частности, многогодовые тренды.** Мы рассчитываем эти коэффициенты для каждого года в предположении, что они линейно зависят от годовых сумм GPP.
- Для расчета регрессии взяты коэфиициенты для всех станций принадлежащих данному типу растительности

При $\alpha > 1$ Ресо может преобладать над GPP, что возникает при высоких значениях GPP

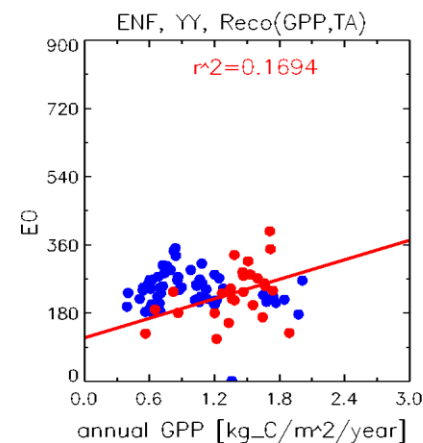
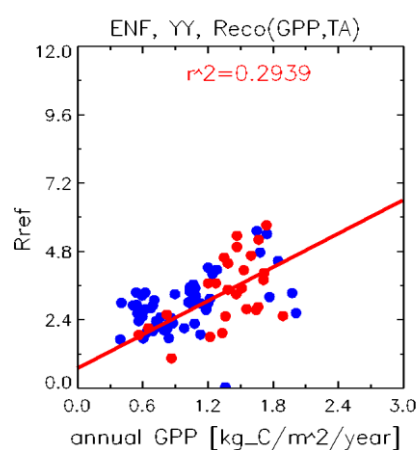
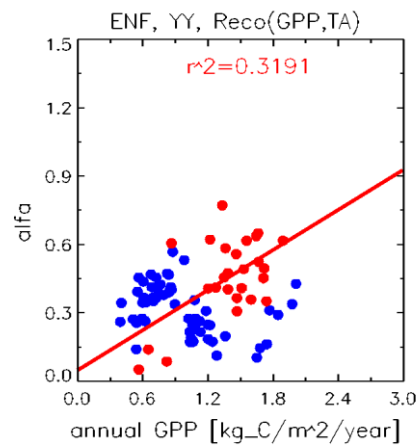
Model 1



Model 2



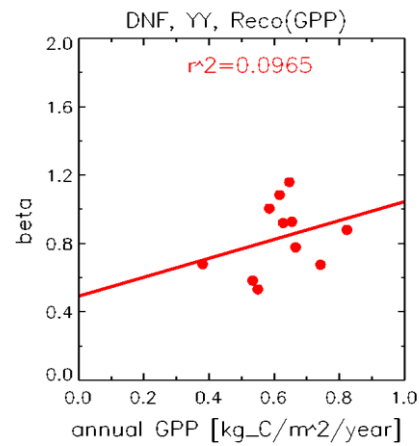
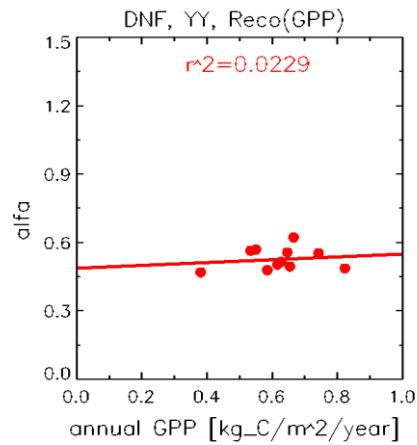
Model 3



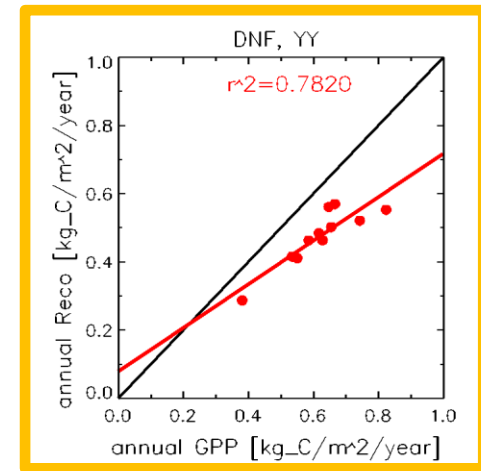
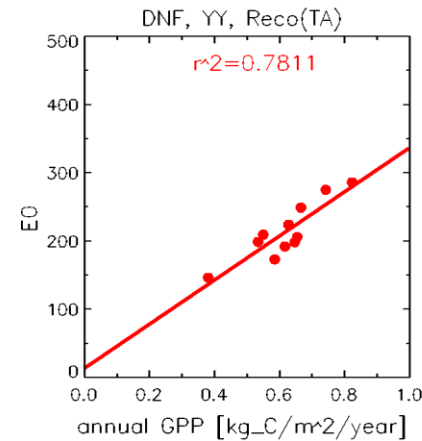
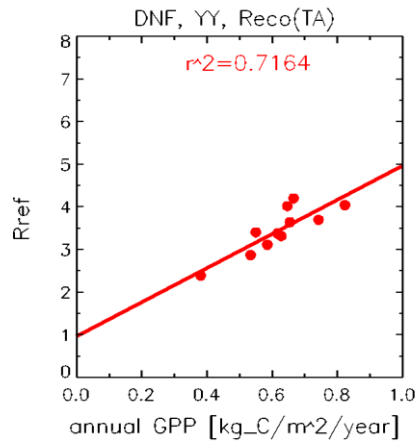
FLUXNET
RUFLUX

$\alpha < 1$ всегда- поэтому Reco
меньше GPP

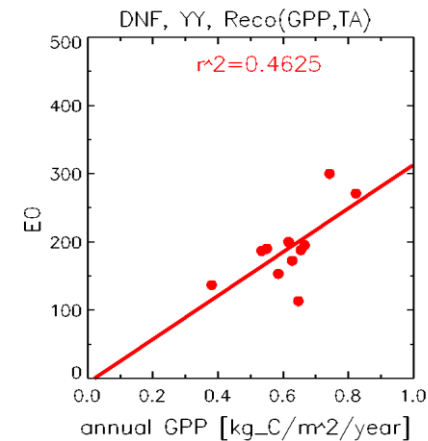
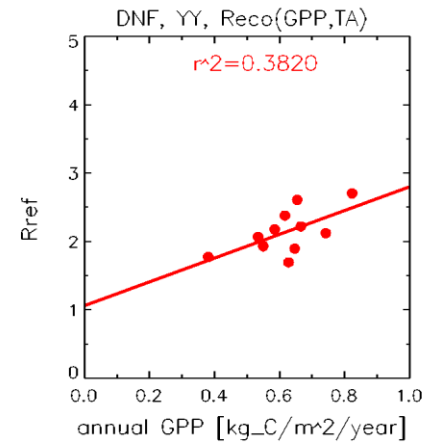
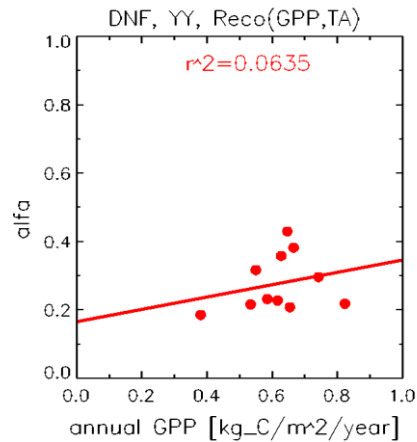
Model 1



Model 2

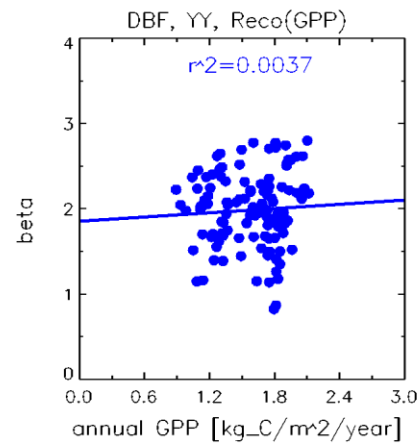
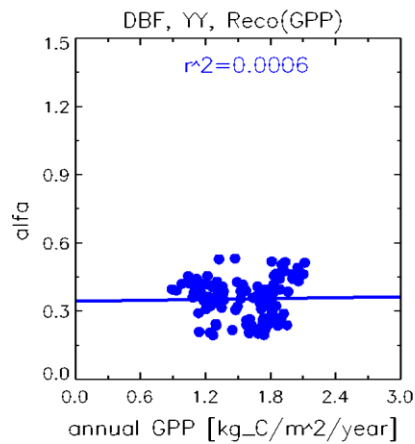


Model 3

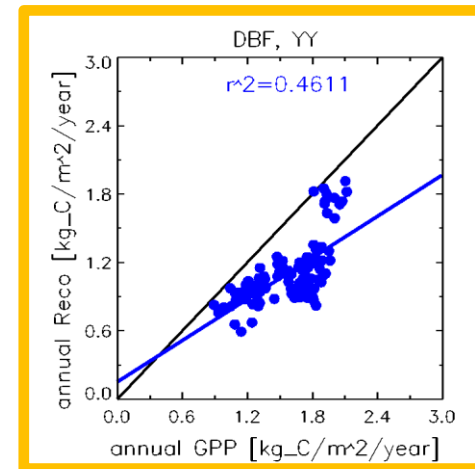
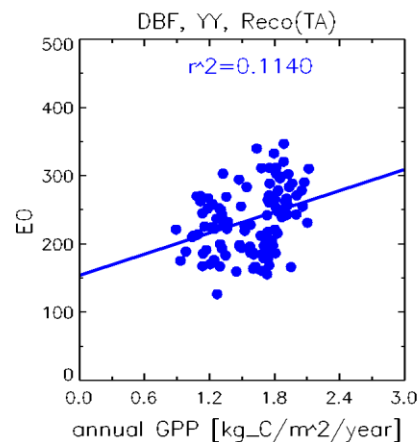
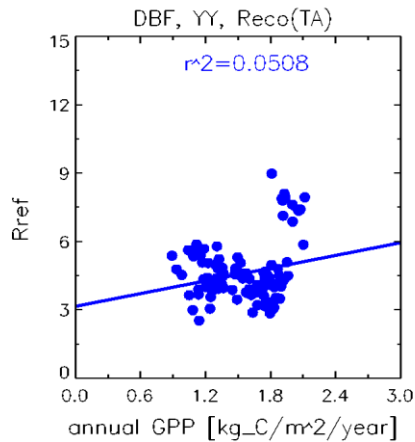


RUFLUX

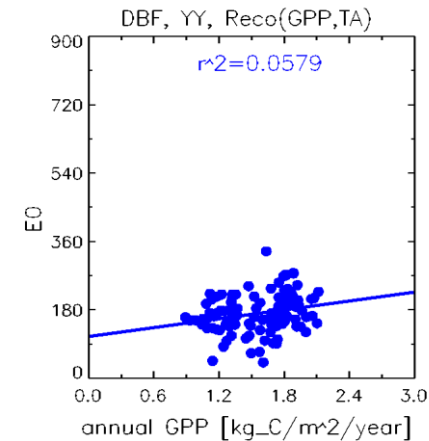
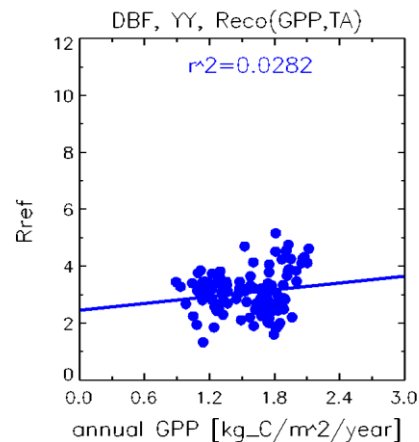
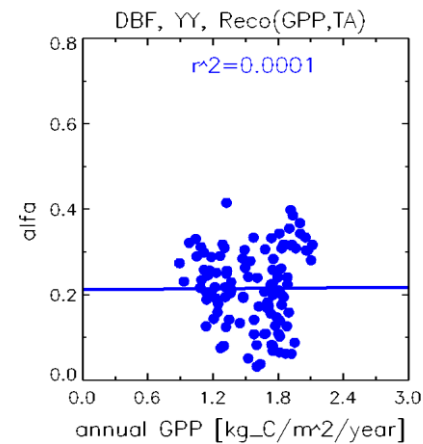
Model 1



Model 2



Model 3

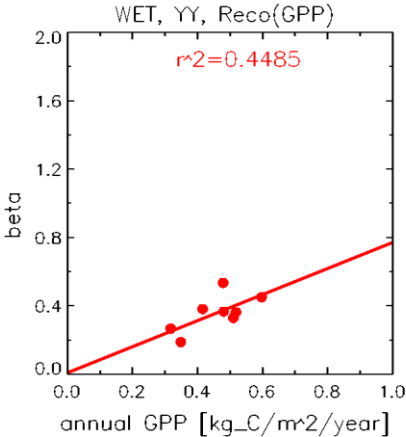
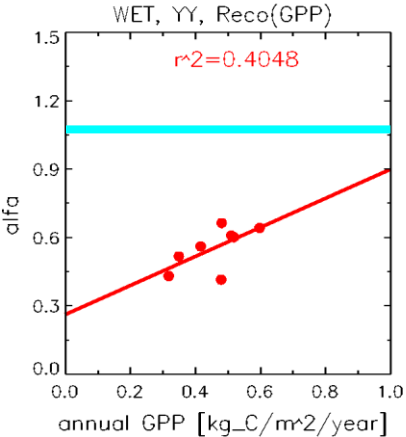


alfa < 1 всегда- поэтому Reco
меньше GPP

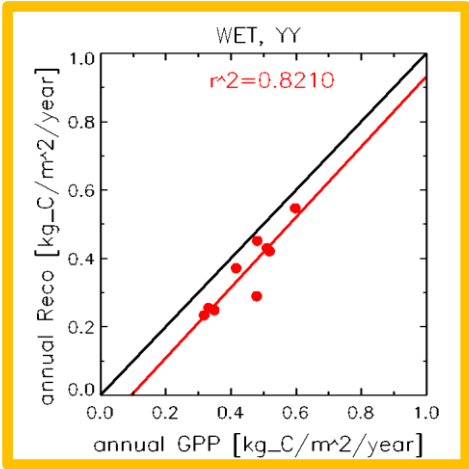
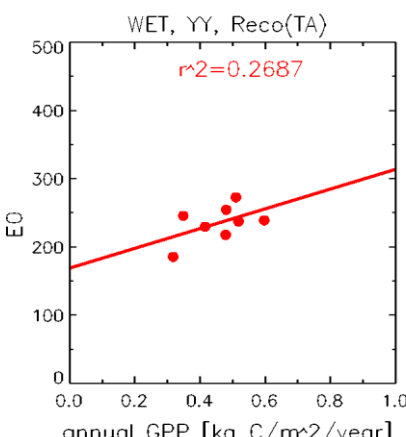
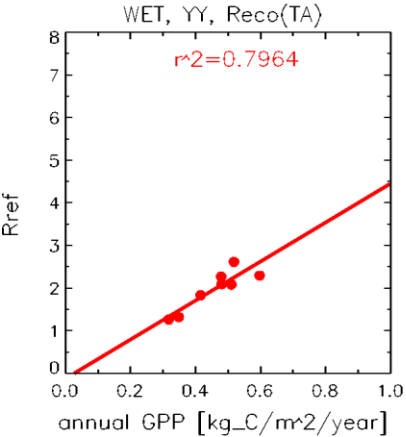
FLUXNET

При $\alpha > 1$ Ресо может преобладать над GPP, что возникает при высоких значениях GPP

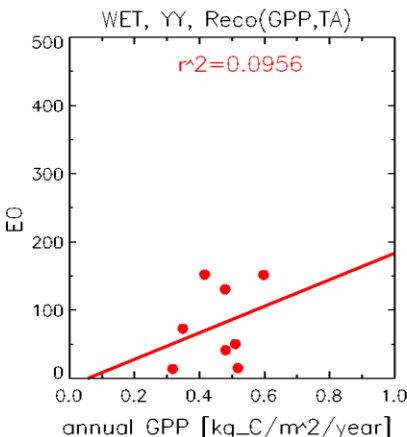
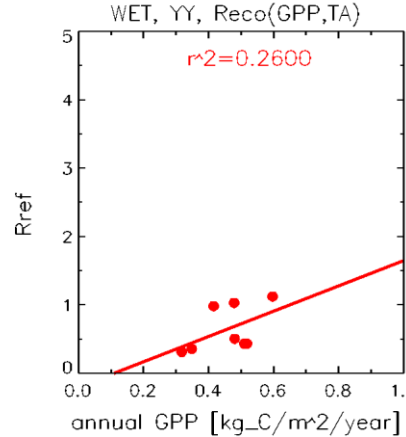
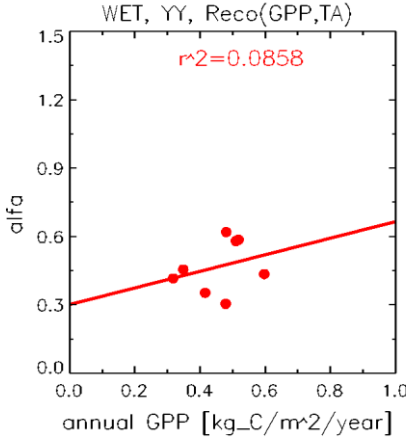
Model 1



Model 2

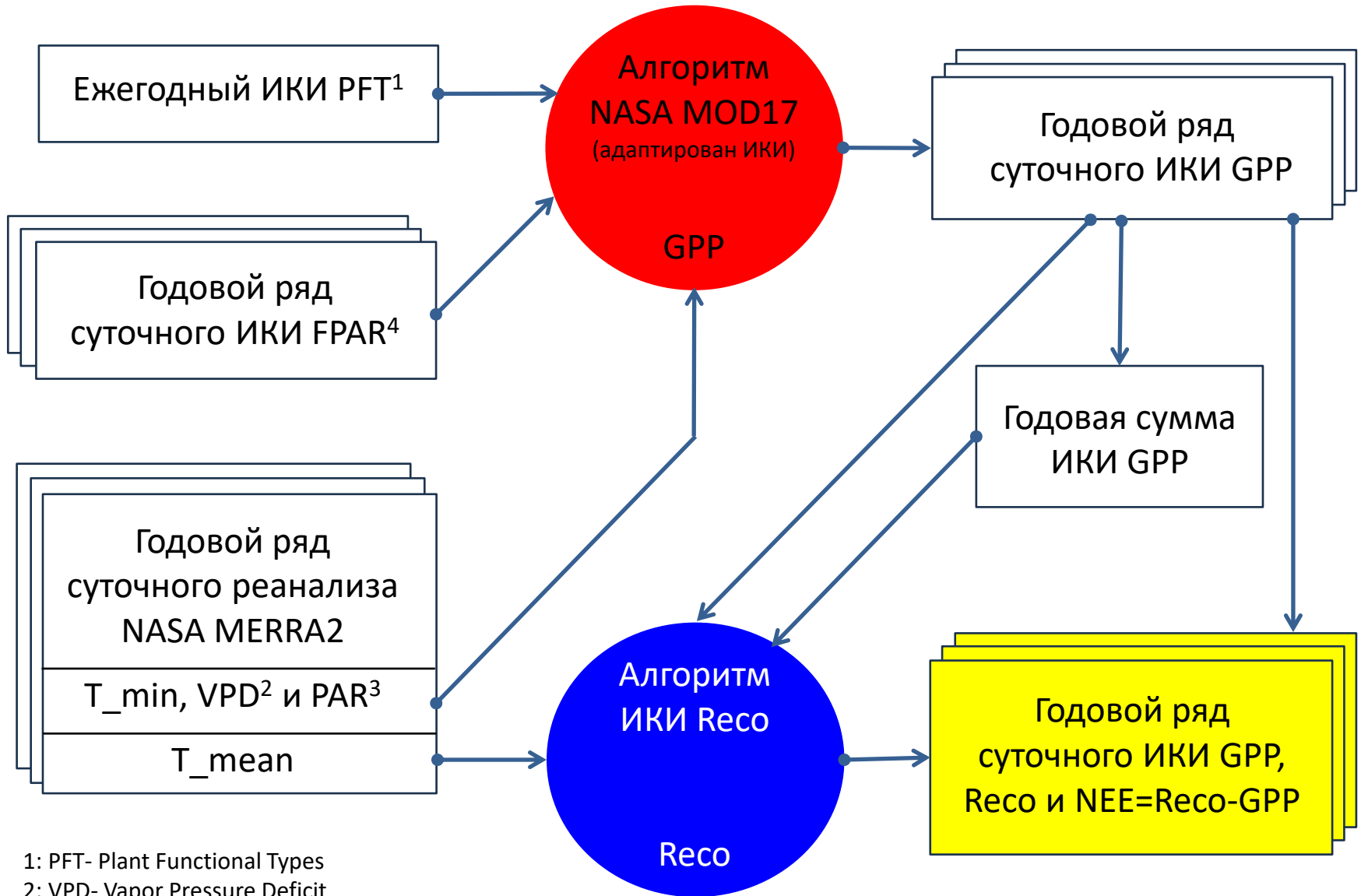


Model 3



RUFLUX

Алгоритм расчета ДЗЗ продуктов потоков углерода GPP/Reco/NEE



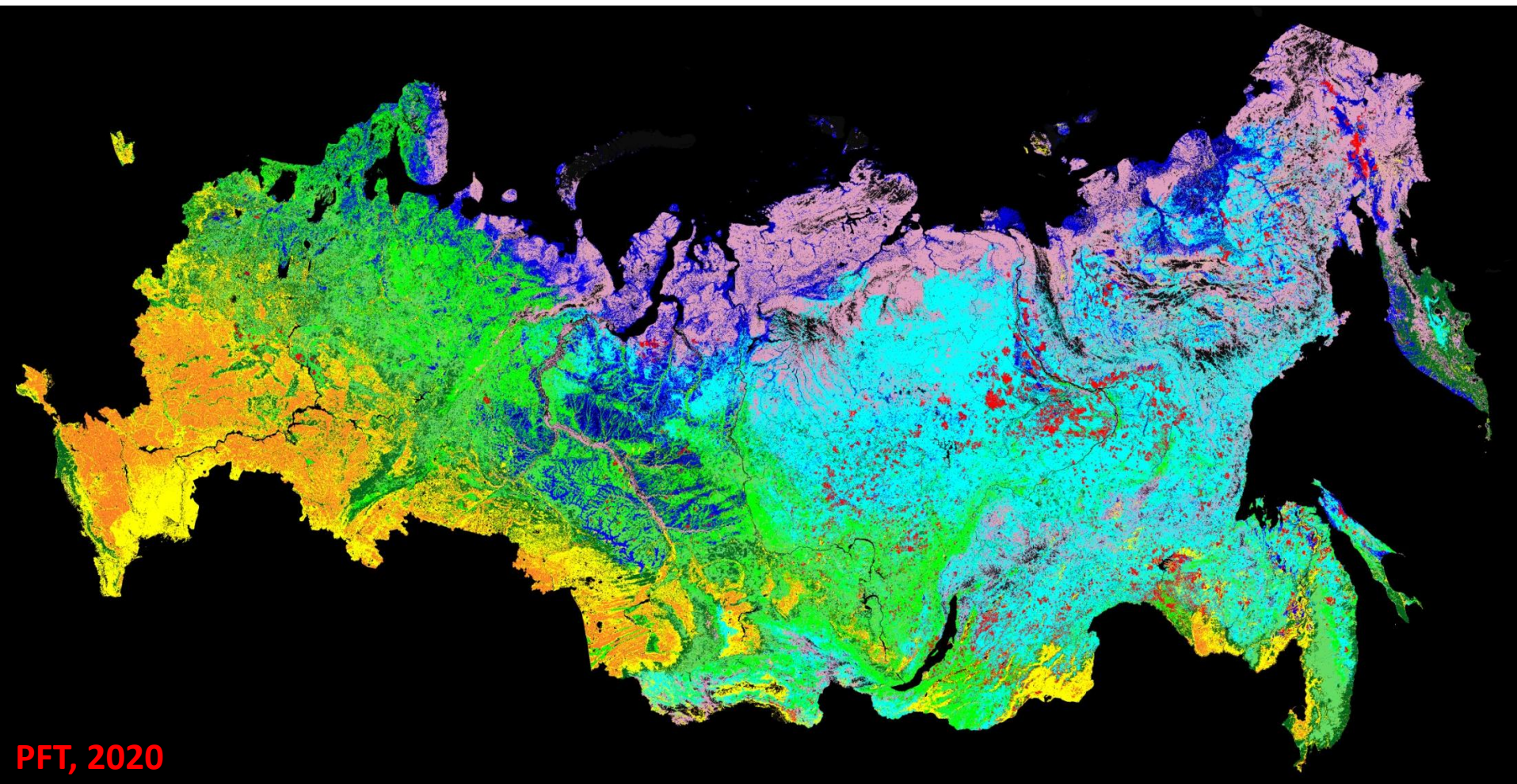
1: PFT- Plant Functional Types

2: VPD- Vapor Pressure Deficit

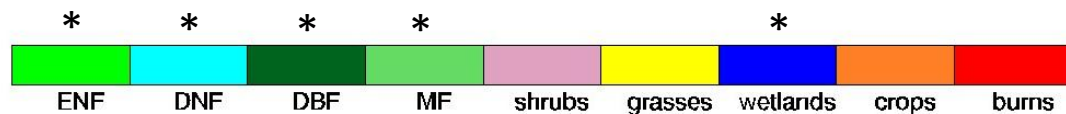
3: PAR- Photosynthetically Active Radiation

4: FPAR- Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by vegetation

Входные данные- ежегодная карта растительности ИКИ MODIS Plant Functional Types (PFT)

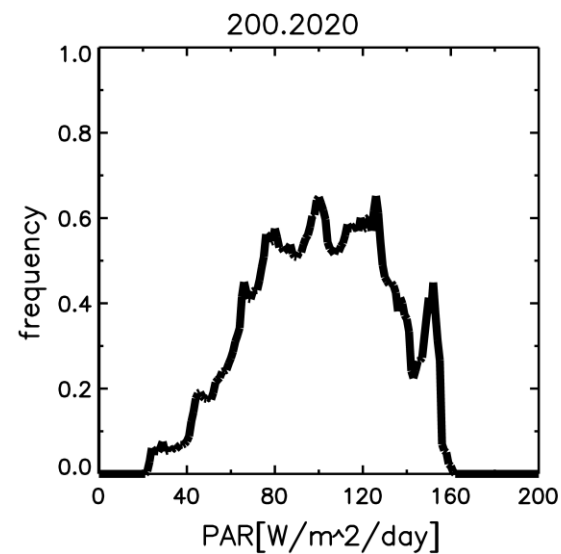
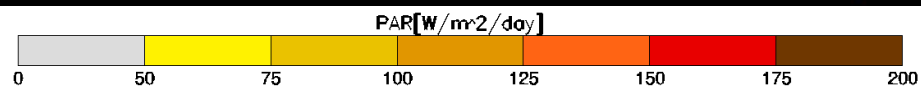
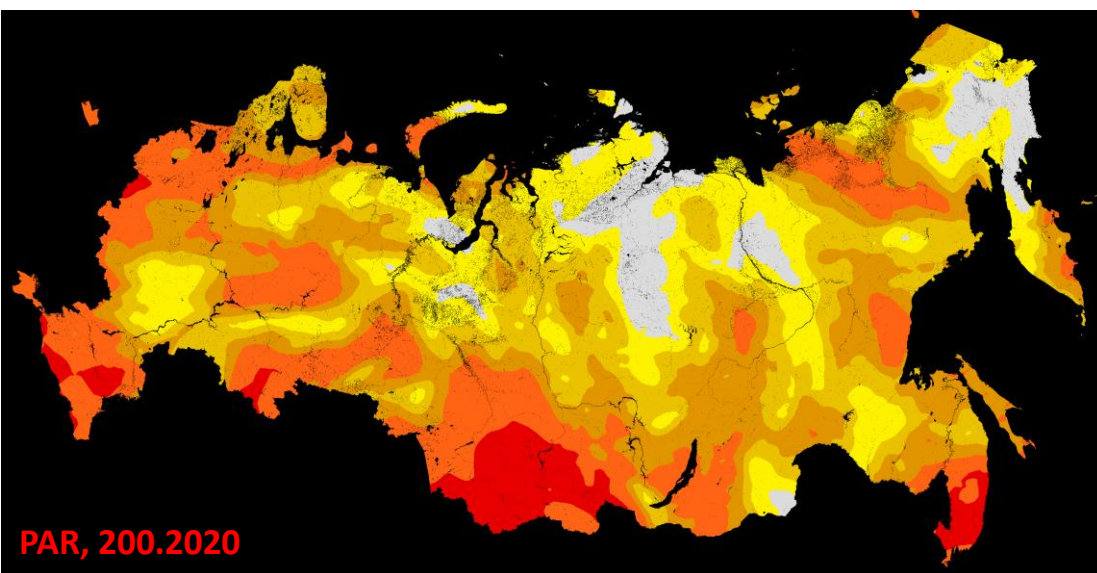
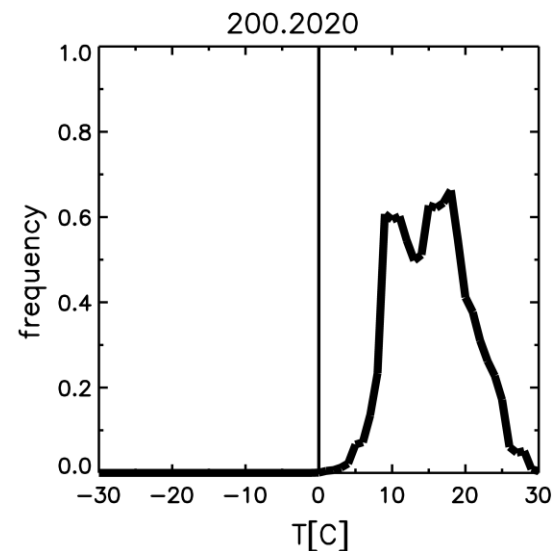
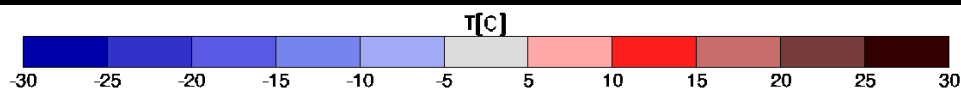
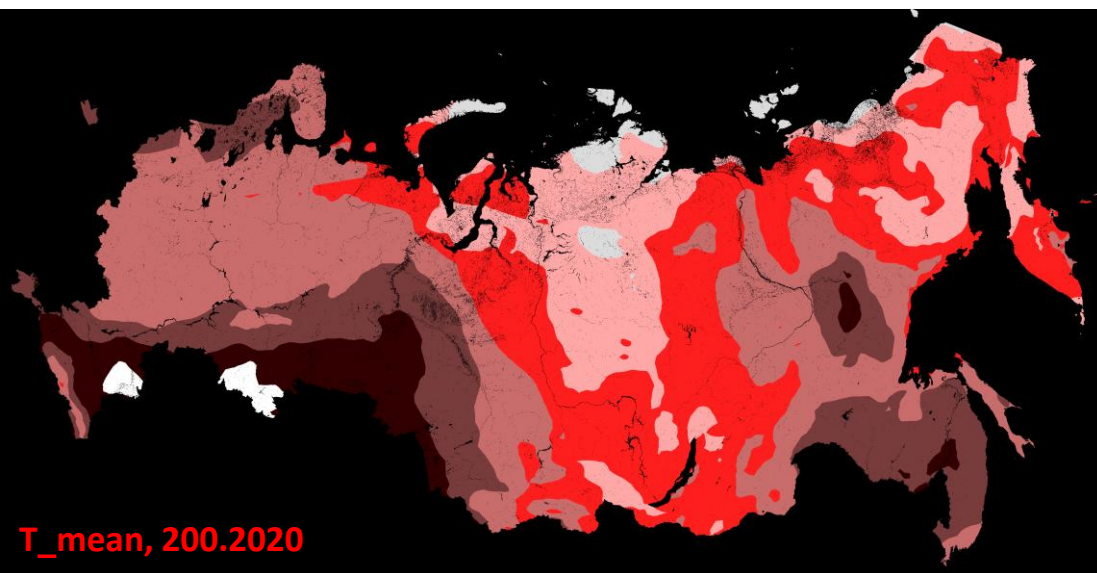


Fill value No data

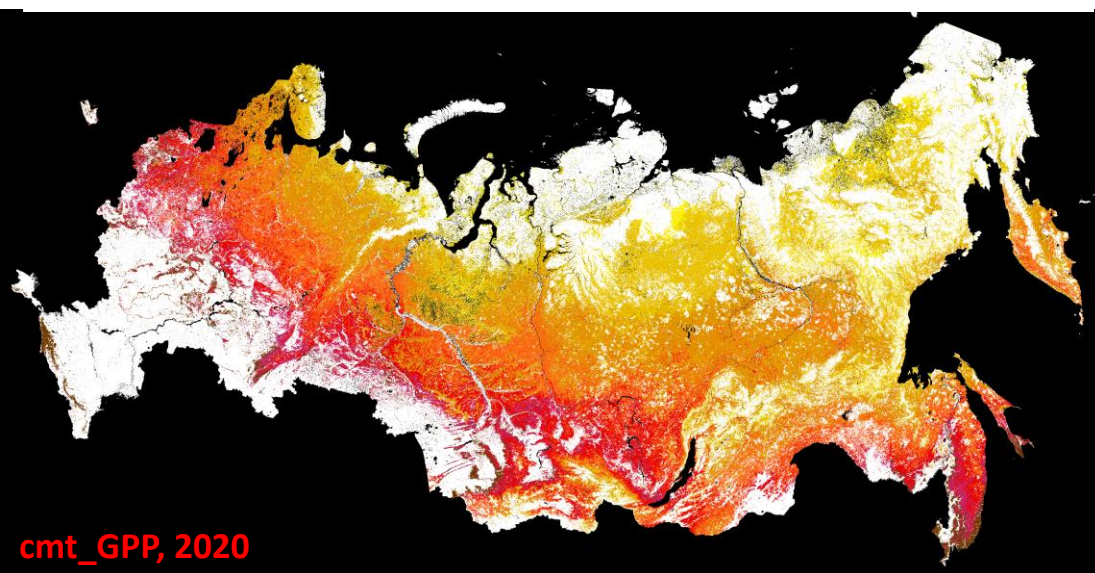
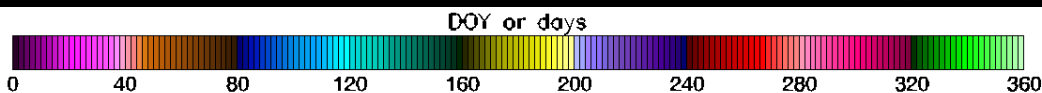
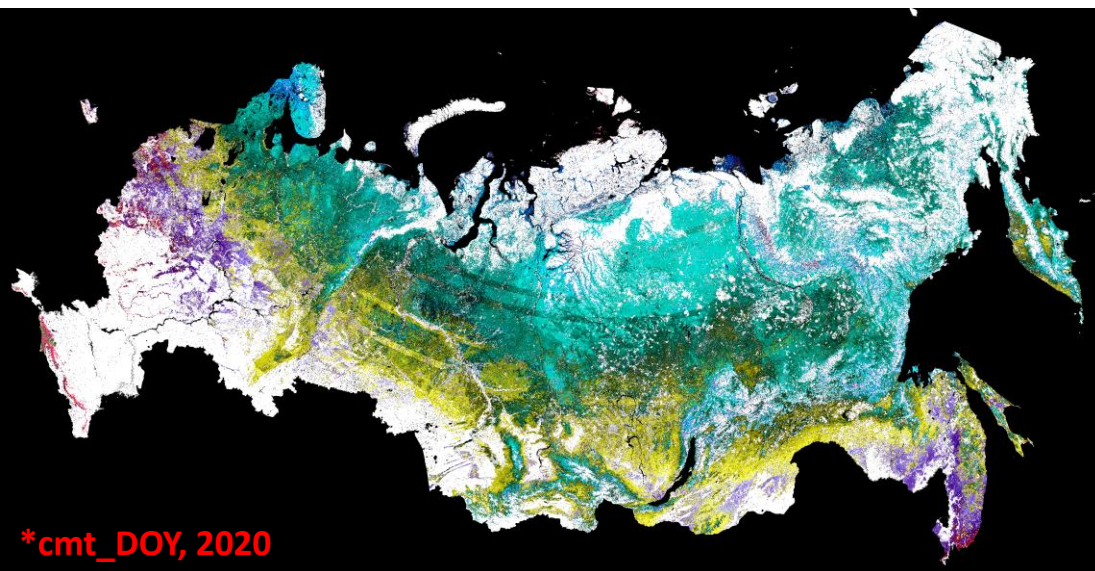


Звездочкой помечены классы, для которых производится расчет Resco

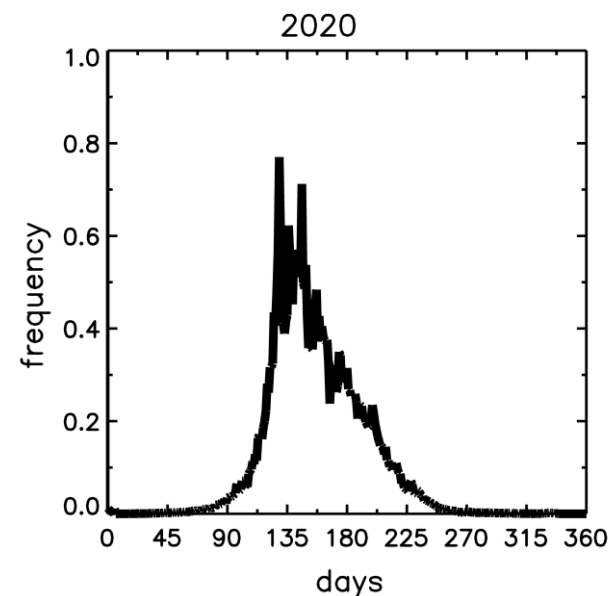
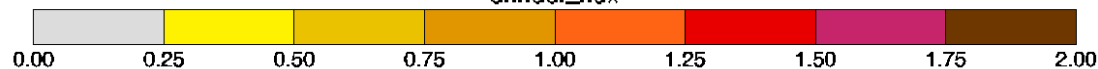
Входные данные- суточные NASA MERRA2 T_mean и PAR



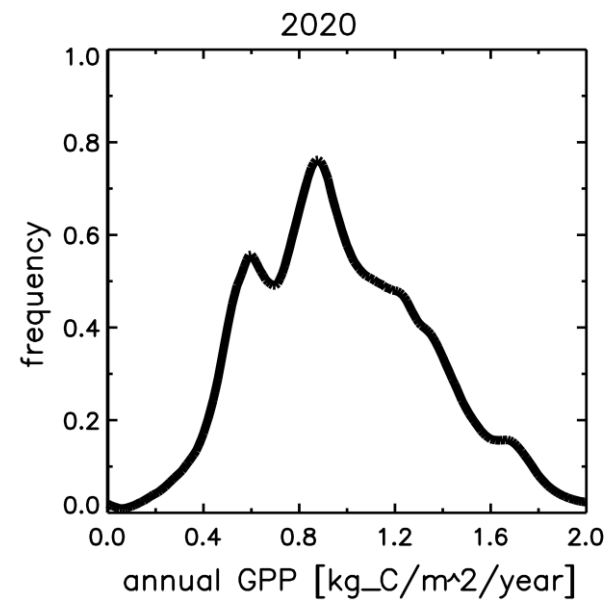
Выходные данные- годовые суммы ИКИ MODIS DOY и GPP



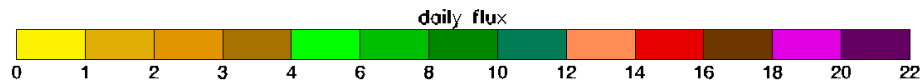
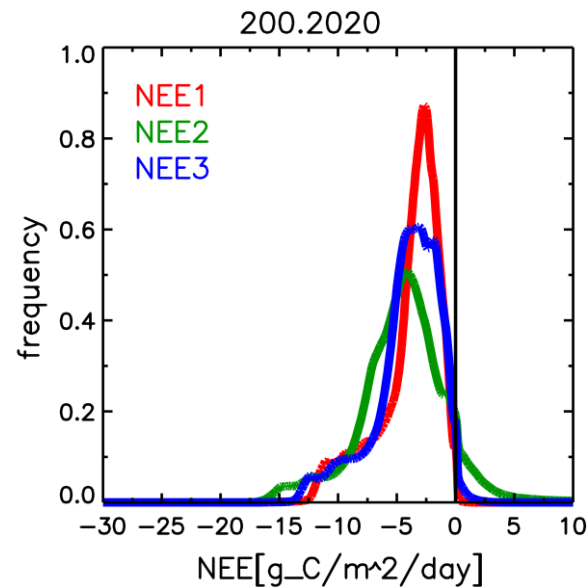
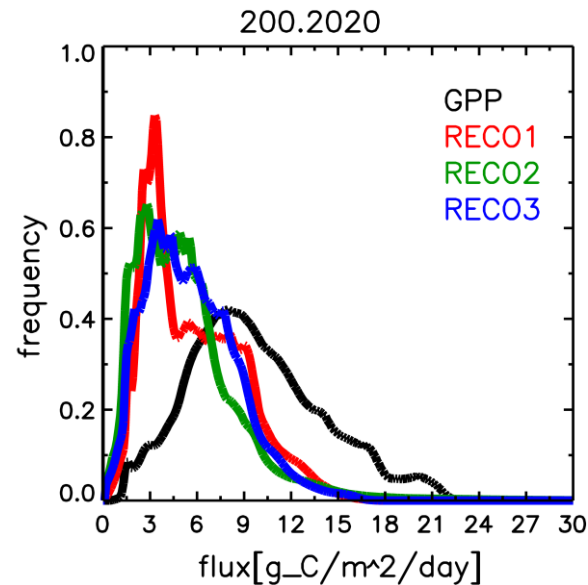
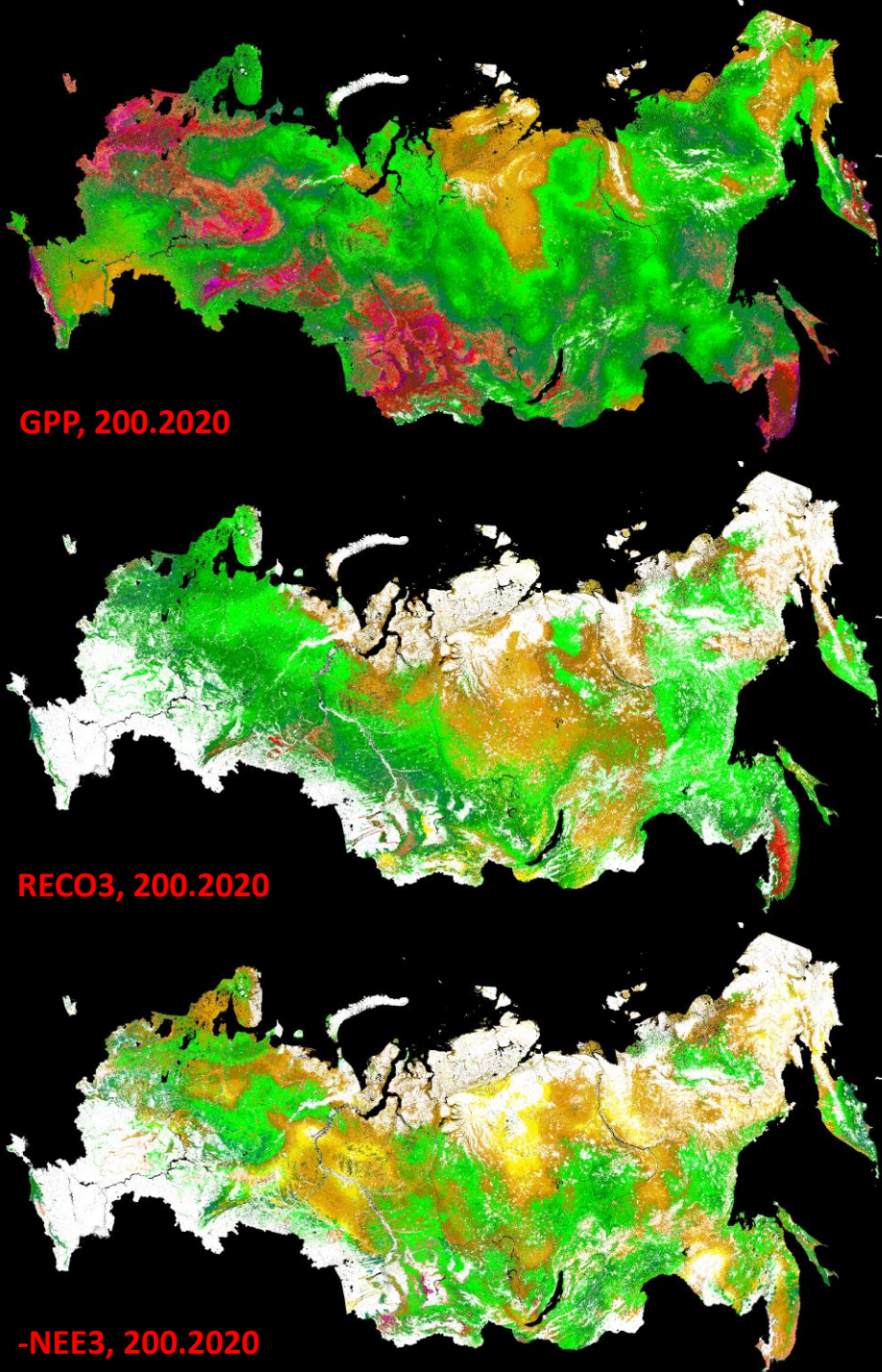
annual_flux



* количество дней в году когда продукт доступен (не fill value)



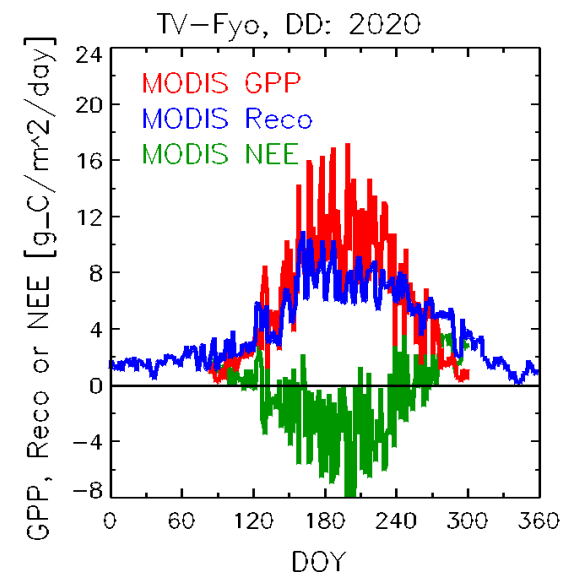
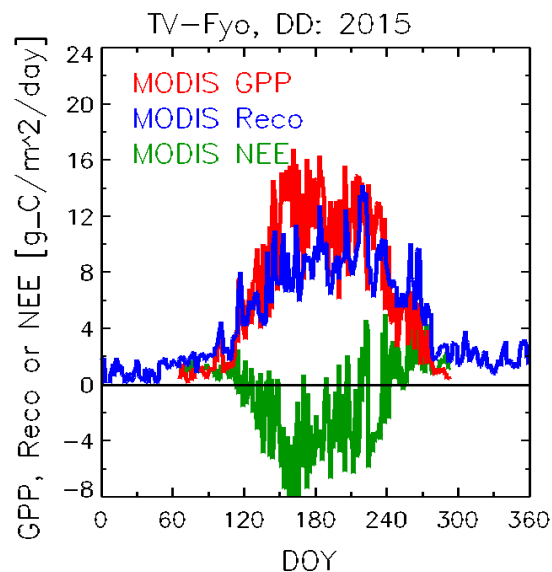
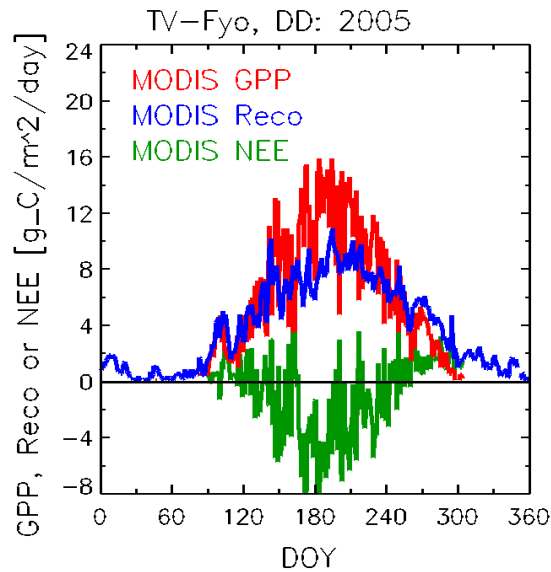
Выходные данные- суточные ИКИ MODIS GPP, RECO3 и NEE3



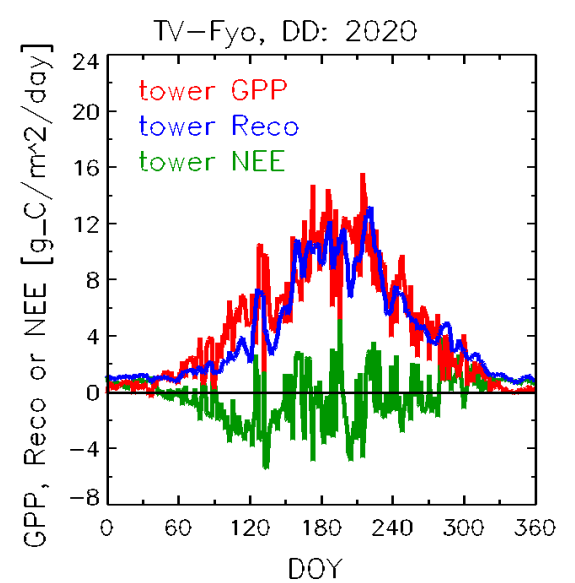
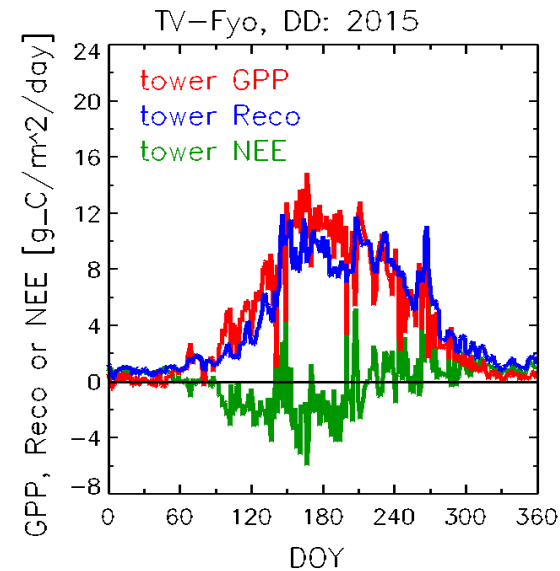
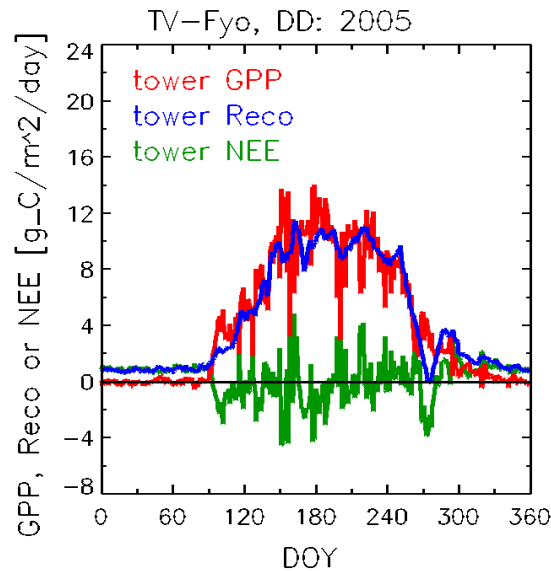
TV-Fyo (h19v03), model2

ENF

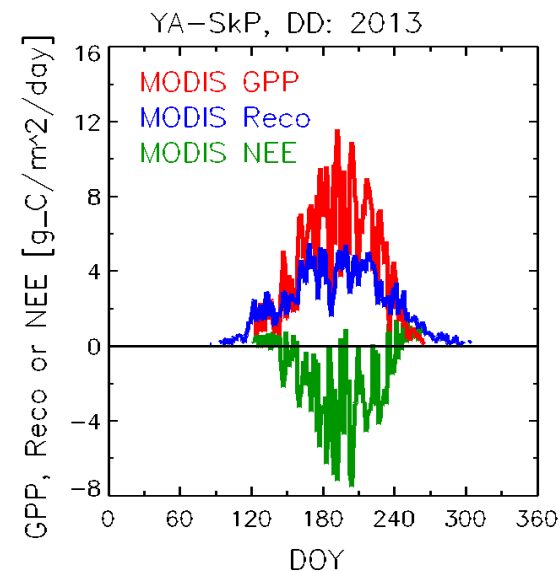
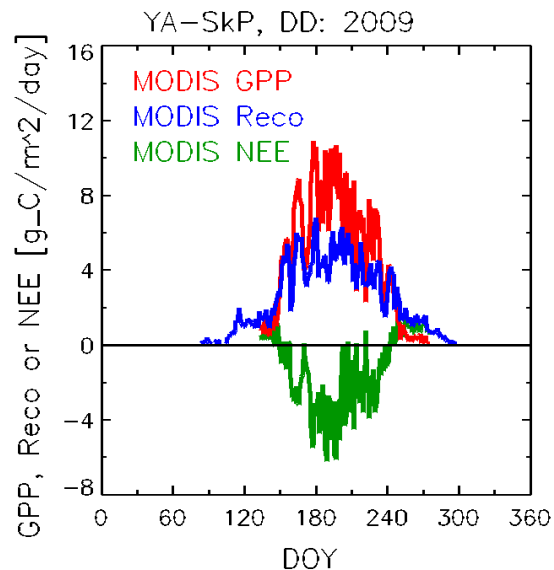
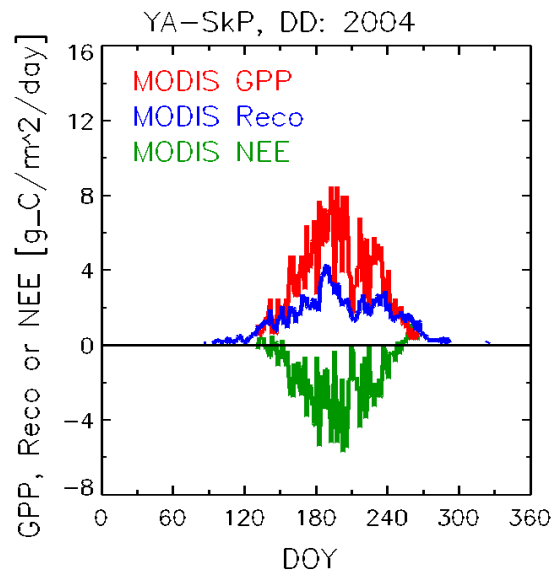
MODIS



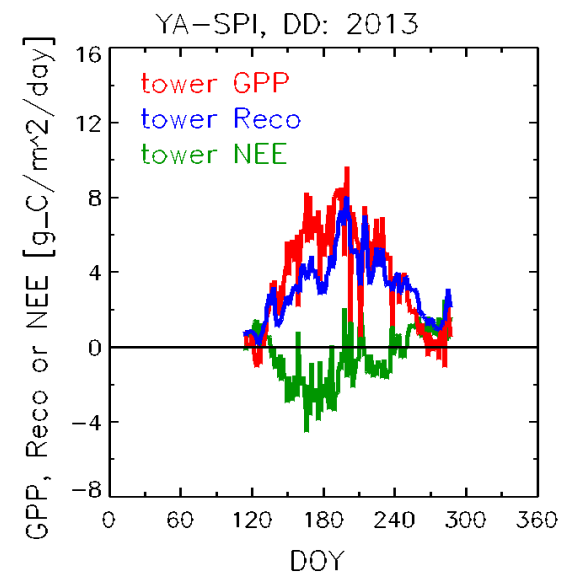
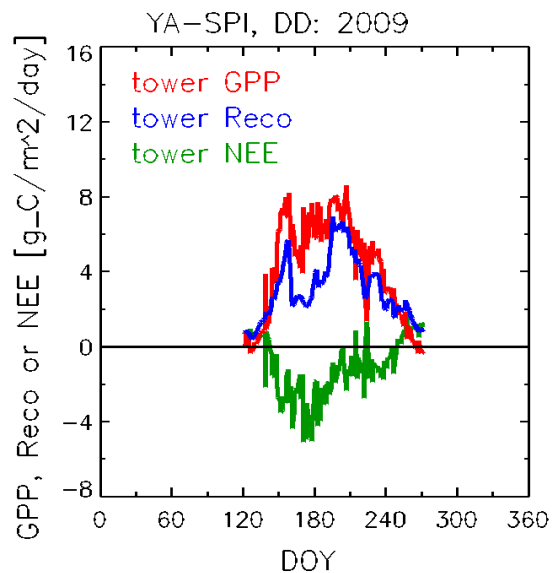
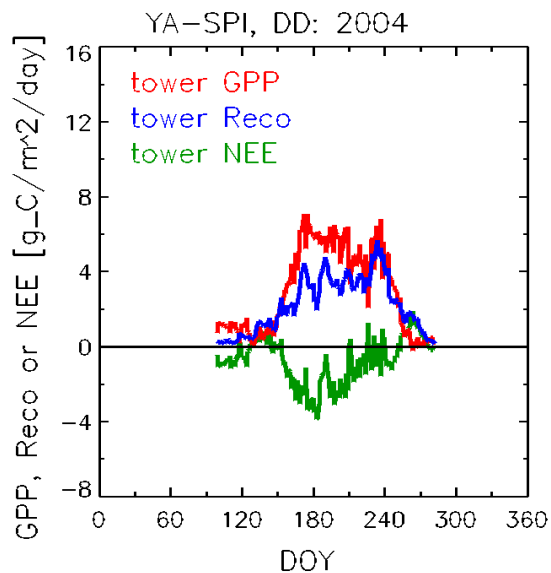
tower



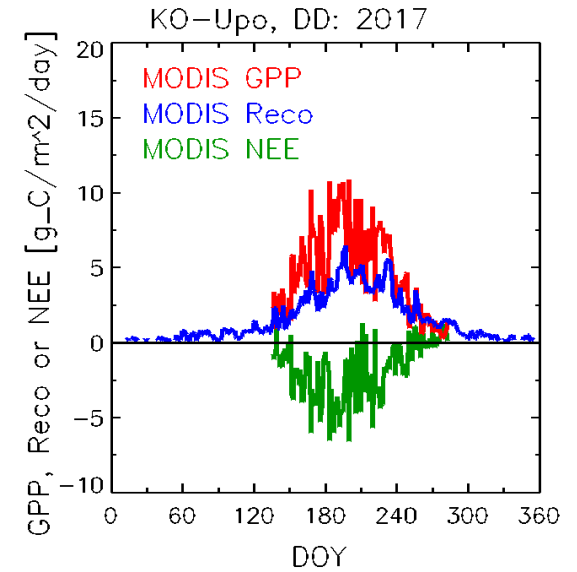
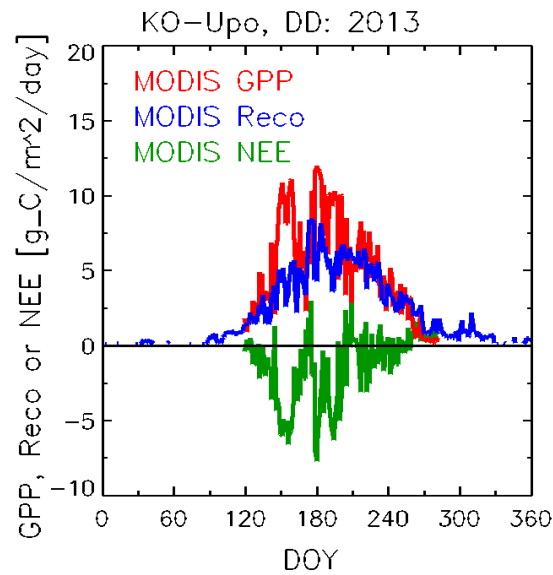
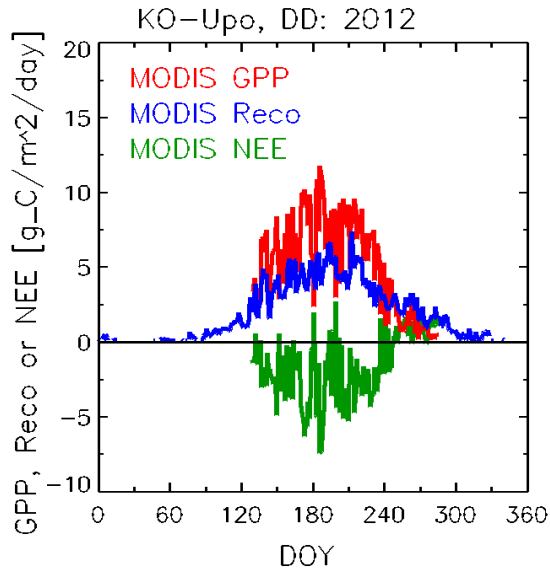
MODIS



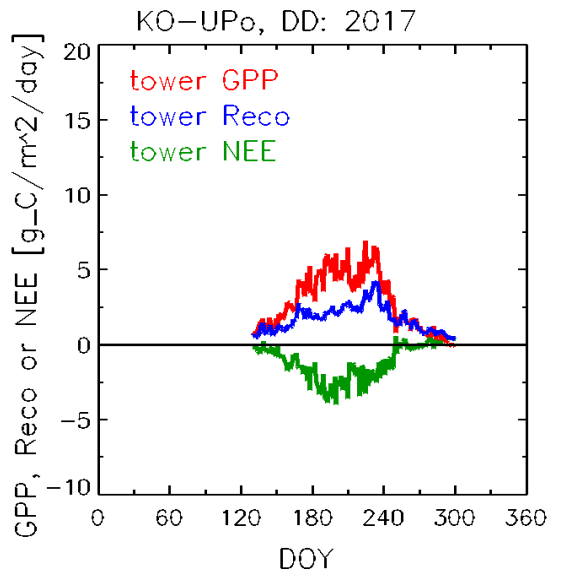
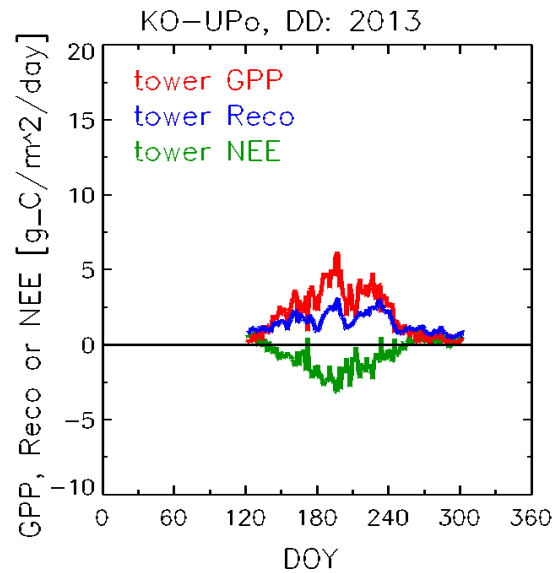
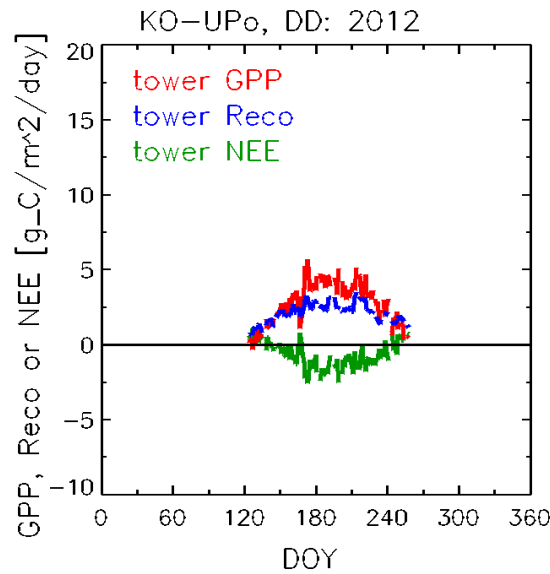
tower



MODIS



tower



Заключение

1. Анализ наземных данных экс показал возможность моделирования сезонного профиля Reco на основе фиксированного набора параметров для каждой из трех предложенных моделей (RECO1-RECO3). Пространственная и межгодовая вариабильность параметров привязаны к вариабельности годовых сумм GPP.
2. На основе предложенных параметрических моделей Reco реализовано автоматизированное ПО по расчету ИКИ MODIS Reco на основе ИКИ MODIS тематических продуктов и реанализа NASA MERRA2.
3. Предварительный анализ суточного продукта MODIS Reco показывает физически обоснованное поведение, однако алгоритм требует оптимизации, в особенности для класса болот.
4. Анализ данных экс и ДЗЗ вскрыл ряд фундаментальных проблем (точка излома моделей дыхания при преходе $T_A=0^{\circ}\text{C}$, причины изменения знака нетто потоков, NEE), которые требуют дальнейшего исследования при оптимизации Reco алгоритма.

Мы благодарим всех участников данного исследования за предоставленные данные RuFlux. Для настройки алгоритма требуется дальнейшее расширение базы данных экс, обработанных единым алгоритмом. По некоторым экосистемам (широколиственные листопадные леса, тундра и др) у нас полностью отсутствуют измерения.