

Разработка алгоритма оценки компонент углеродного баланса растительного покрова России на основе спутниковых данных MODIS

Н.В. Шабанов^а, С.А. Барталев^а, О.А. Куричева^б, А.В. Варлагин^б, С.В. Загирова^в,
Т.С. Миклашевич^г, Т.Х. Максимов^д, М. Мигловец^в, В.В. Мамкин^б

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) ИКИЗ РАН, Москва, Россия

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

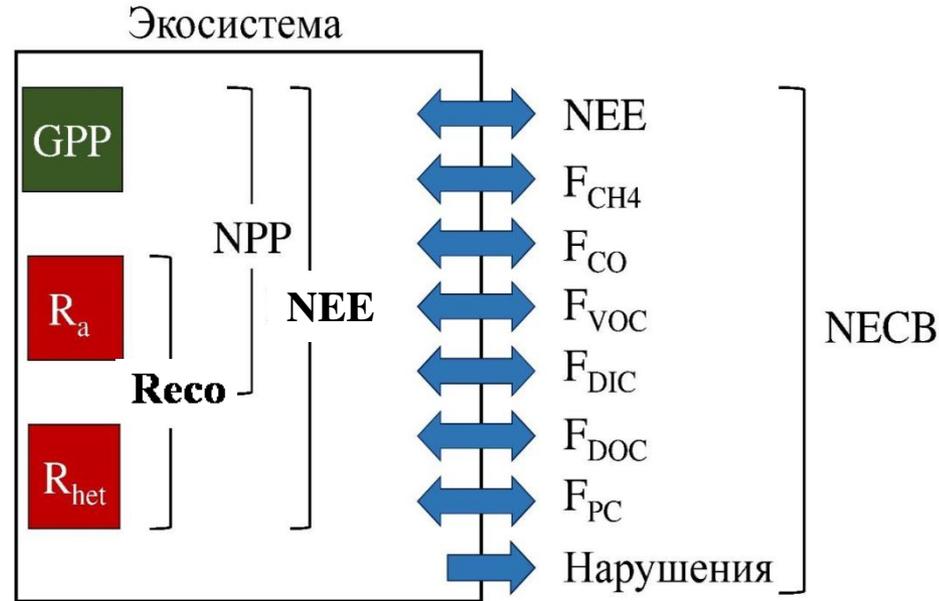


СПДЗ-2024, ИКИ РАН, Москва, Россия
13 ноября 2024 г.

Задачи данной работы

- Разработка ПО для автоматизированного расчета продукта IKI GPP (чистая первичная продукция) согласно алгоритму NASA MOD17 (концепция эффективности использования солнечной радиации в фотосинтезе)
- Анализ данных RuFlux для выявления связи переменных углеродного баланса (поглощение и дыхание) а также для калибровка и валидация IKI GPP/NEE продукта
- Разработка нового алгоритма оценки экосистемного дыхания для расчета нетто экосистемного обмена на основе анализа наземных измерений сети станций RuFlux

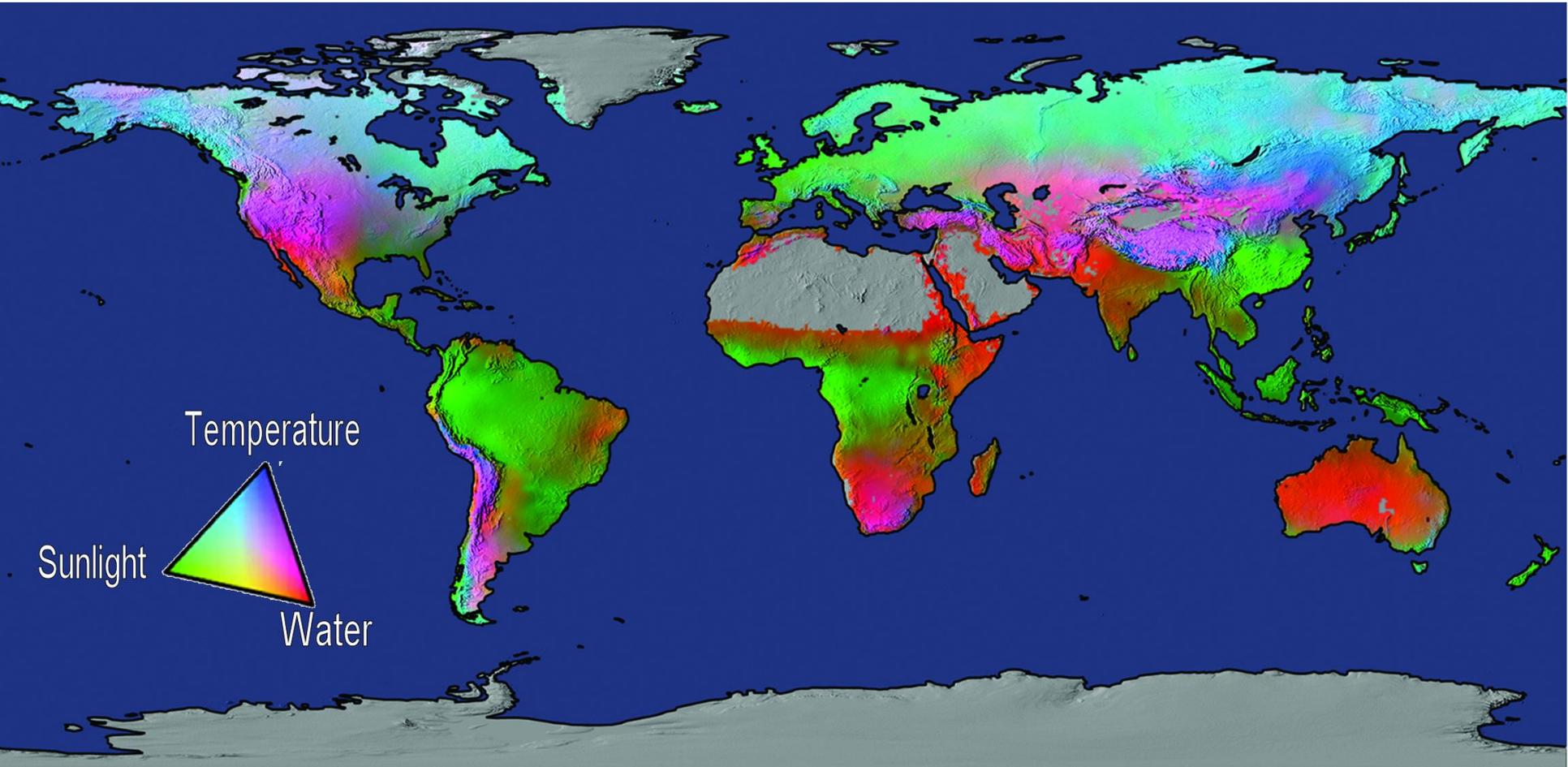
Баланс потоков углерода



(из Курбатова и др., СПДЗ-2023)

- GPP – валовая первичная продукция (количество C, поглощенное экосистемой в ходе фотосинтеза)
- Reco – полное дыхание экосистемы (количество C, выпущенное экосистемой в процессе дыхания)
 $Reco = R_a + R_h$
- 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 C растениями)
 $NPP = GPP - R_a$
- NEE – чистый экосистемный обмен – баланс с атмосферой экосистемных потоков CO₂
 $NEE = -(GPP - R_a - R_h) = Reco - GPP$

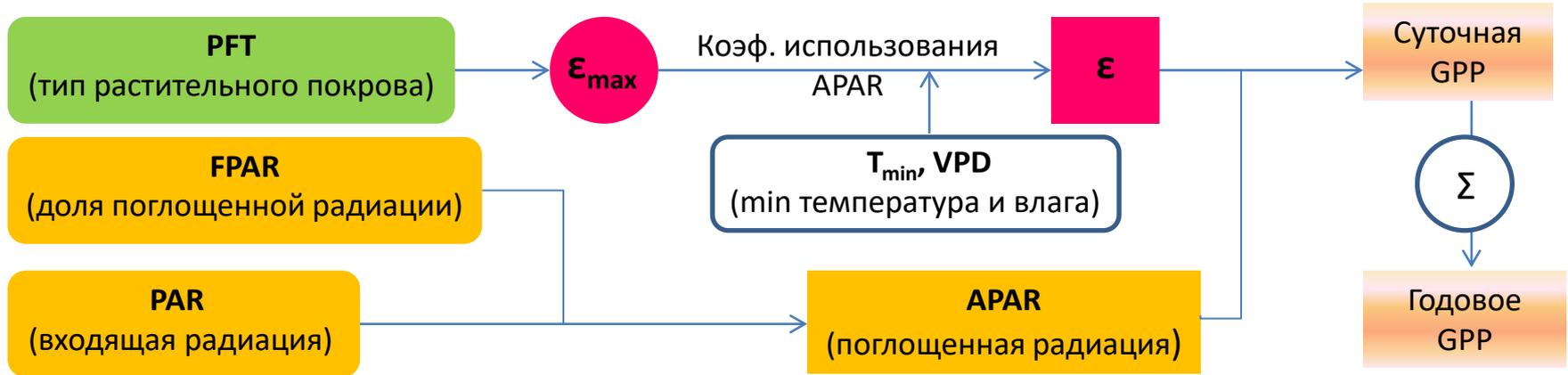
Основные факторы определяющие поглощение углерода в экосистеме в процессе фотосинтеза



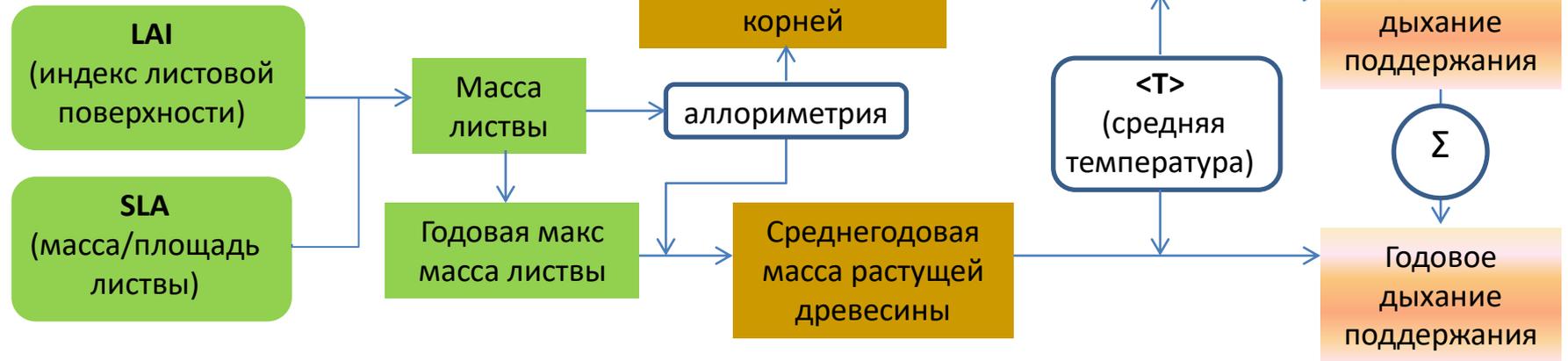
(from MOD17 User Guide)

Схема алгоритма MOD17- расчет GPP и NPP

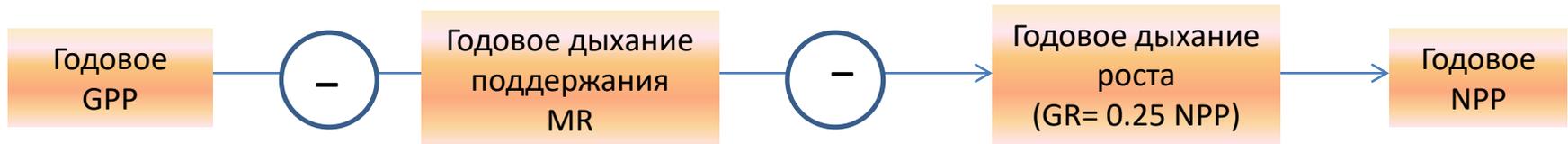
GPP (Валовая Первичная Продукция)



MR (Дыхание Поддержания)



NPP (Чистая Первичная Продукция)



Алгоритм MOD17 GPP

$$GPP = \varepsilon \times APAR$$

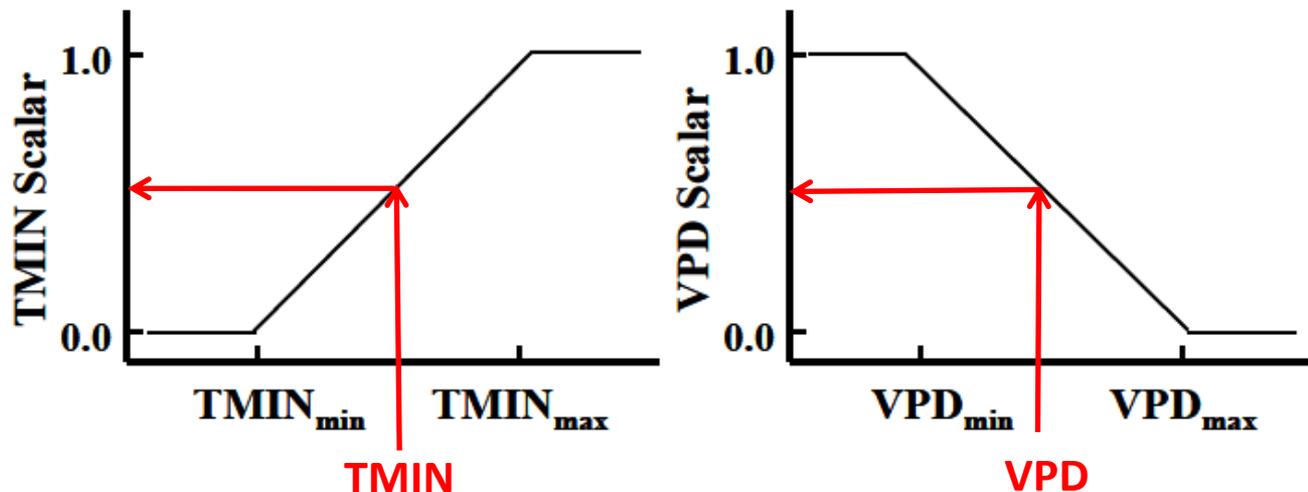
$$APAR = PAR \times FPAR$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \times TMIN_Salar \times VPD_Scalar$$

PAR- входящая радиация
FPAR- доля радиации
поглощенная растительностью
APAR- поглощенная радиация

ε – Light Use Efficiency (LUE)- эффективность использования солнечной энергии в процессе фотосинтеза

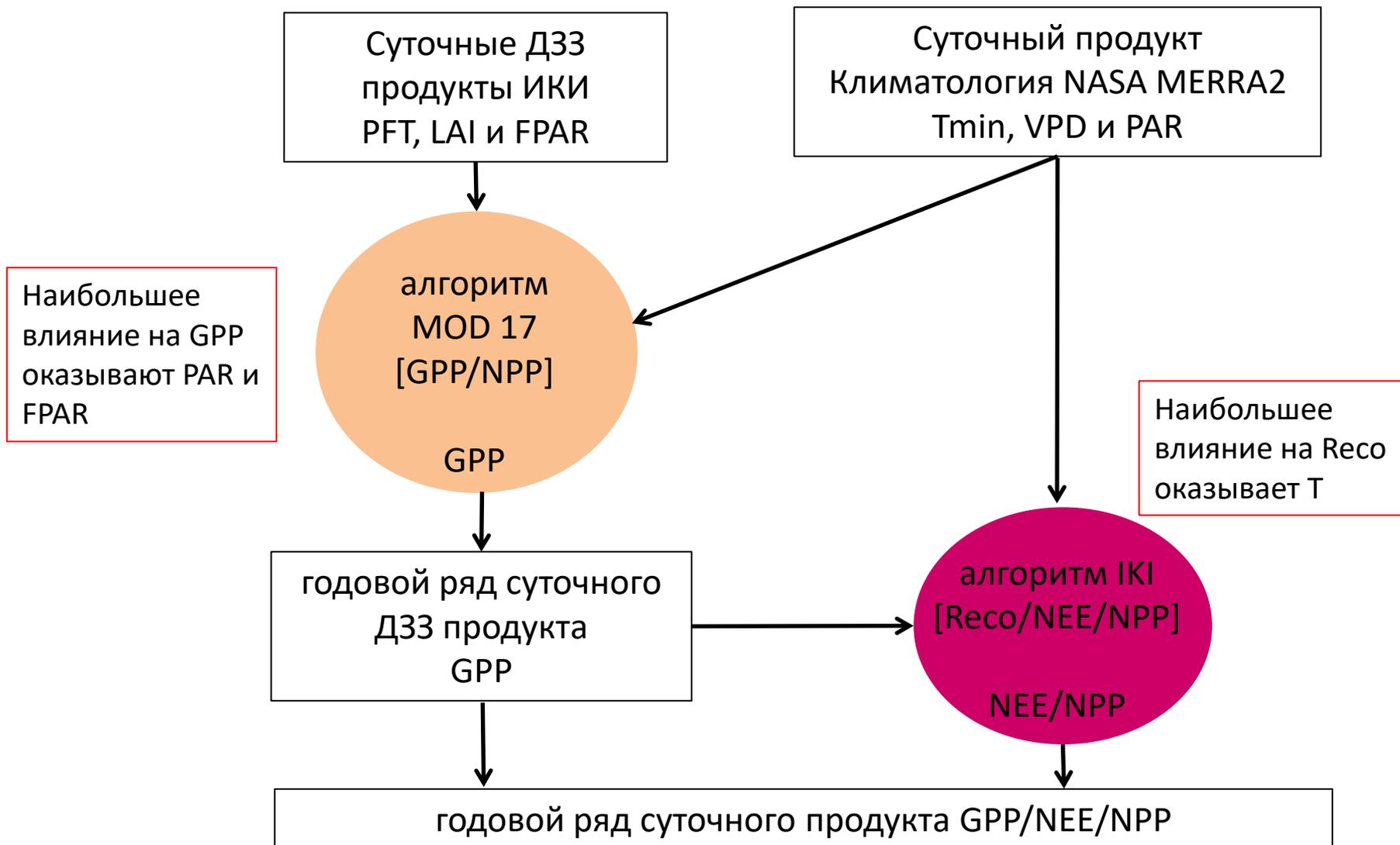
Максимальное значение ε ослабляется ввиду неоптимальности для фотосинтеза условий по температуре и влаге



Основные недостатки применения алгоритма MOD17 для России

- 1) Теоретическая основа качественно выполнена для расчета поглощения углерода (GPP) и основана биологических принципах. Расчет дыхания выполнен в ограниченном объеме (компоненты автотрофного дыхания) и основан на значительных аппроксимациях. NPP рассчитан только на годовом уровне, а оценка NEE отсутствует (вместе с оценкой гетеротрофного дыхания).
- 2) В модельных данных отсутствует класс болот (представлен кустарниками) и класс гарей
- 3) Оценка FPAR используется только для прямого излучения, не учитывает актуальное состояние атмосферы (долю рассеяног излучения)
- 4) Низкое пространственно-временное разрешение

Автоматизированная система расчета продукта IKI GPP/NEE/NPP



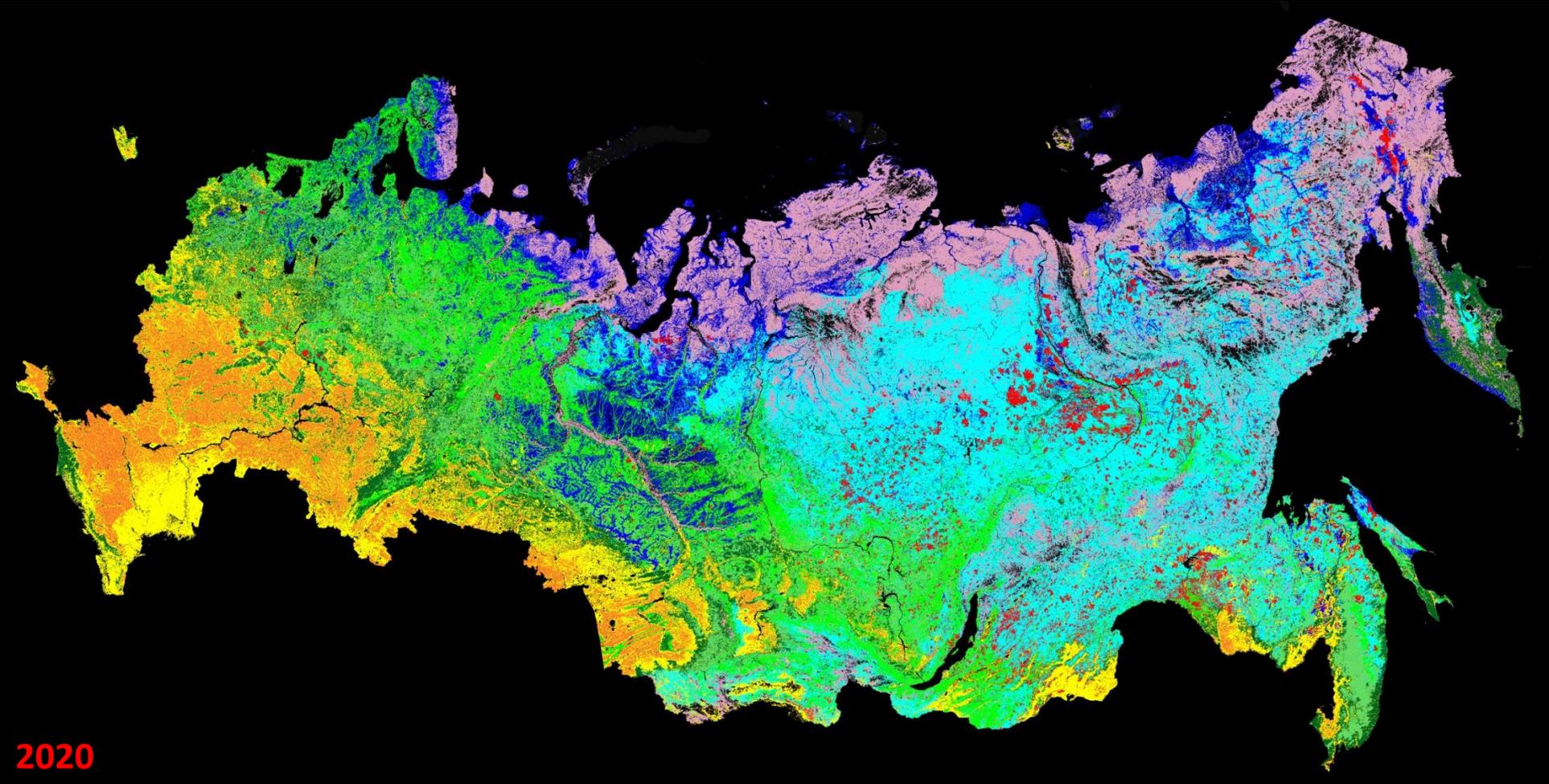
Код алгоритма MOD17 (python) находится в свободном доступе, <https://github.com/arthur-e/MOD17>

Данные станций российской сети мониторинга парниковых газов (RuFlux)

1. Федоровское-0 (Тверская область, заболоченный ельник с примесью березы, 1998-2020)
2. Федоровское-2 (Тверская область, 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. Спасская Падь (Якутия, лиственничник, 2012-2014)
6. Усть-Пожег (Республика Коми, мезоолиготрофное болото, 2012-2013)

Используются с целью калибровки и валидации ДЗЗ GPP/NEE продуктов

Входные данные алгоритма GPP: IKI PFT



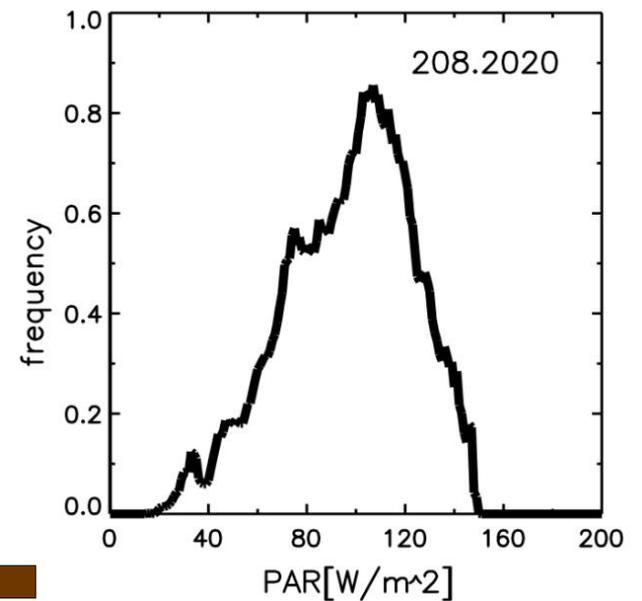
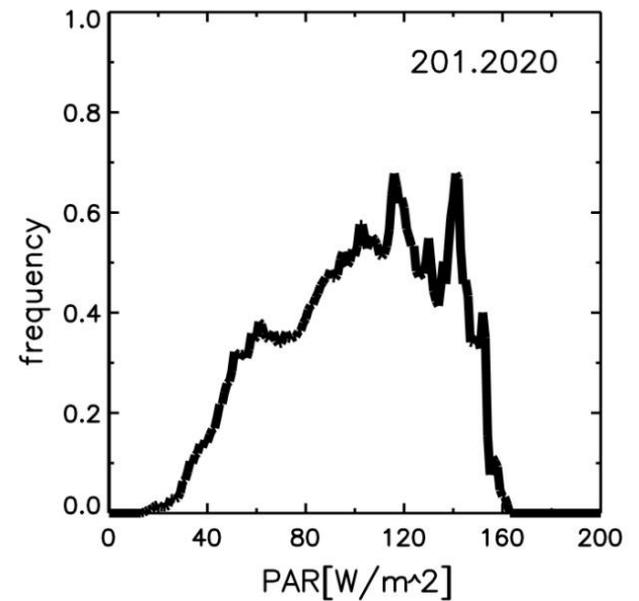
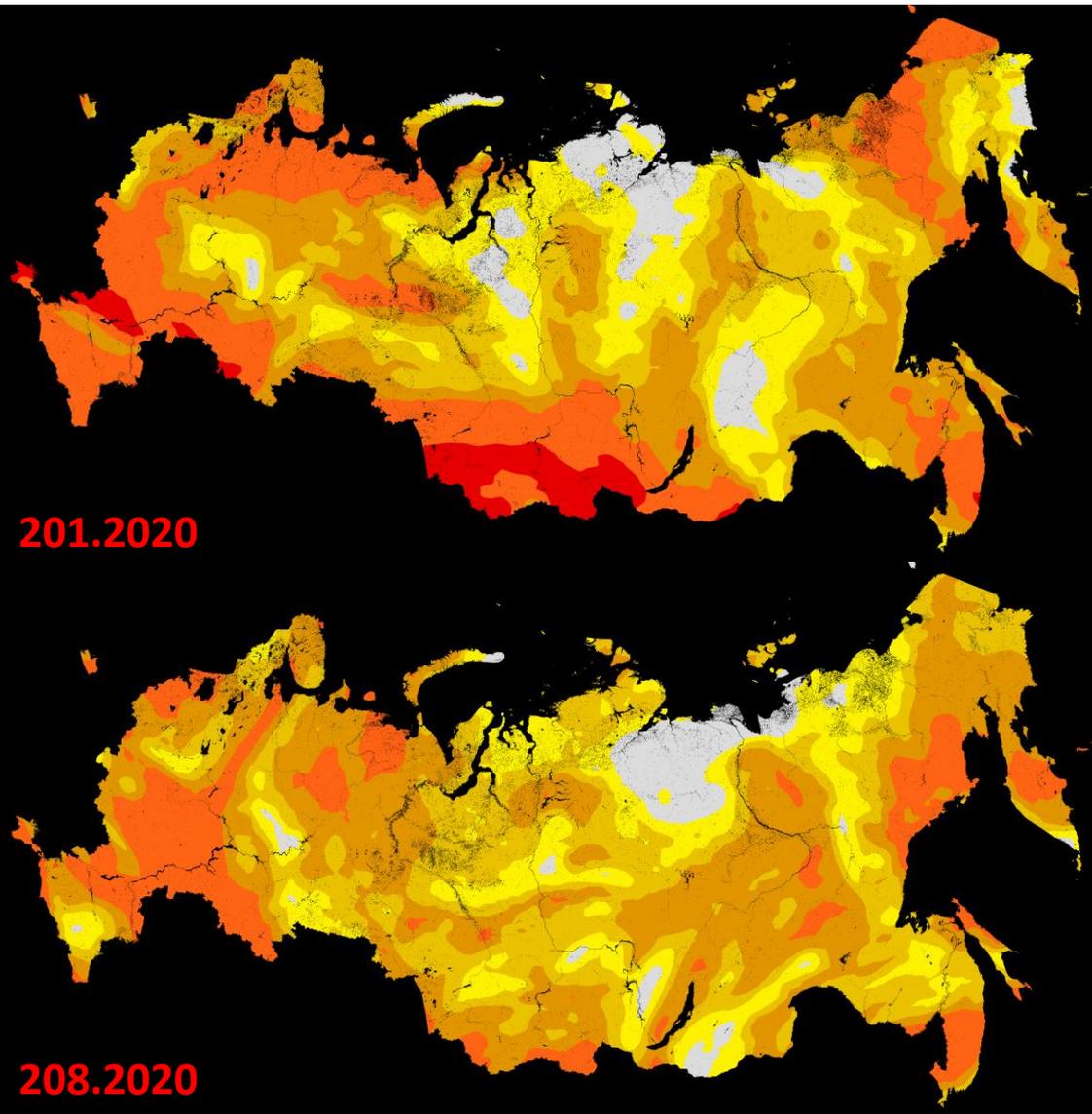
2020

Fill value No data



В оригинальном алгоритме MOD17 отсутствует класс болот и гарей

Входные данные алгоритма GPP: MERRA2 PAR

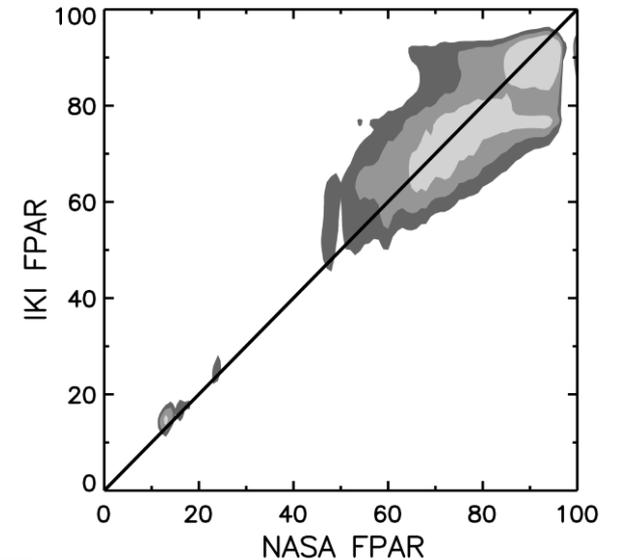
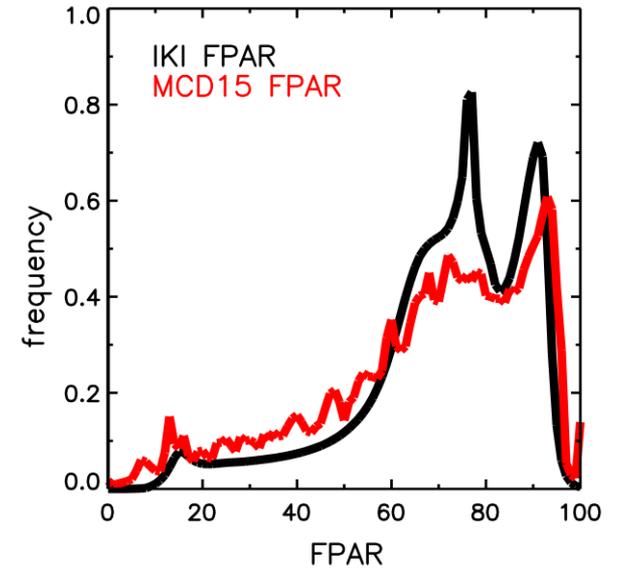
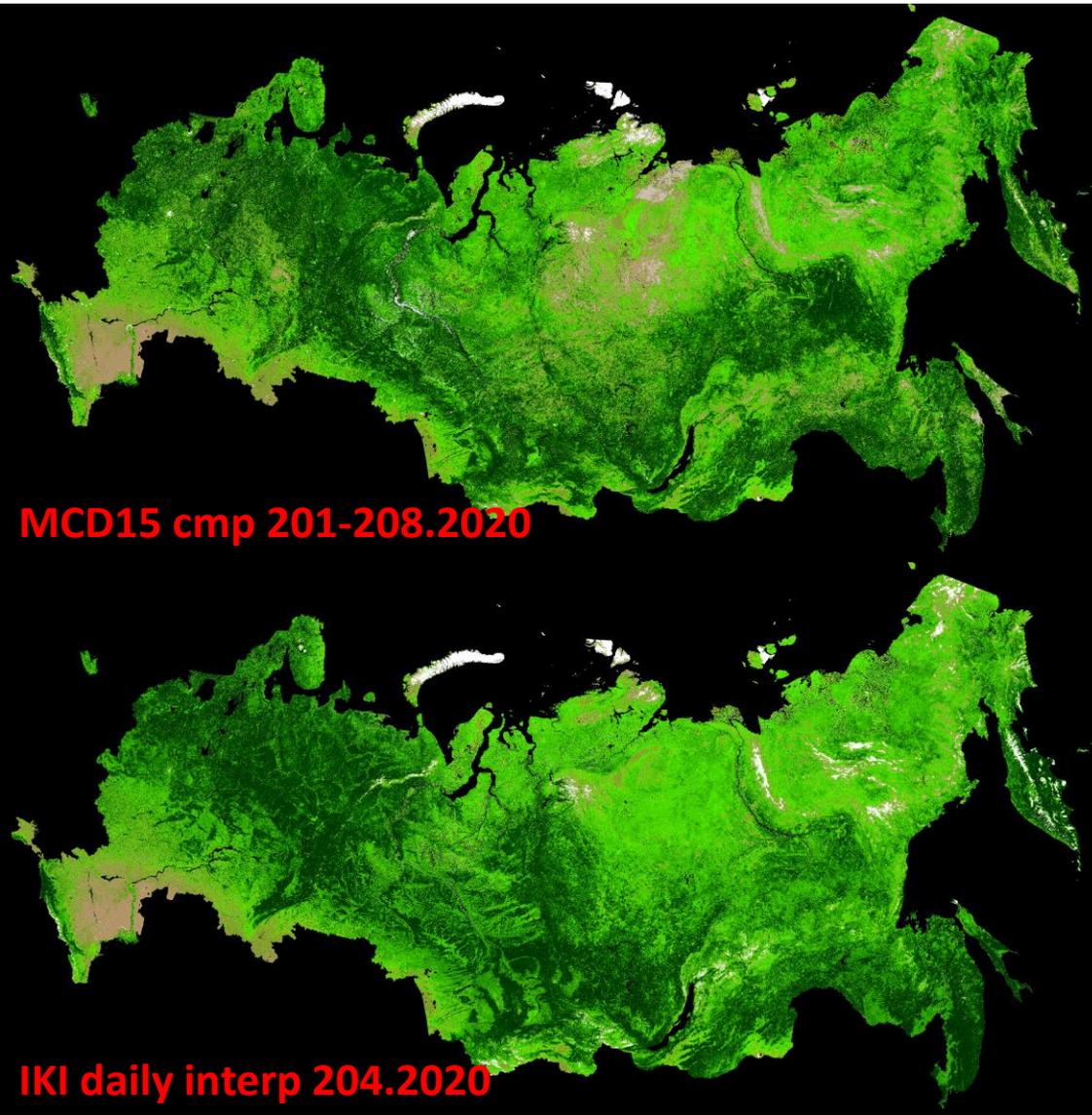


Fill value No data

PAR



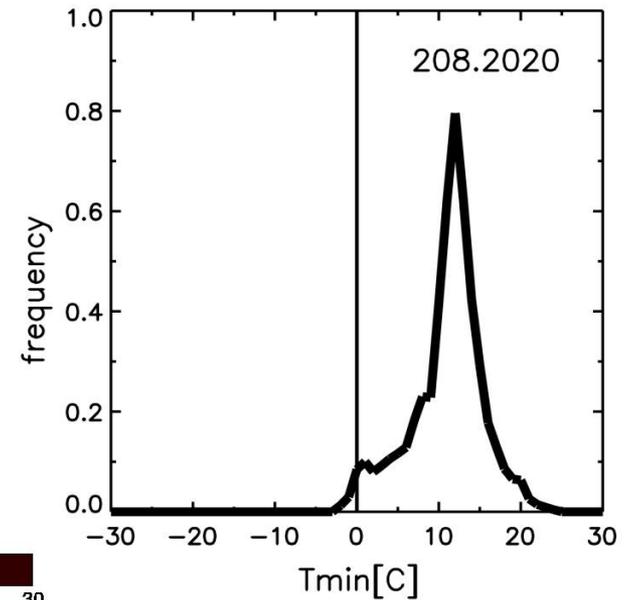
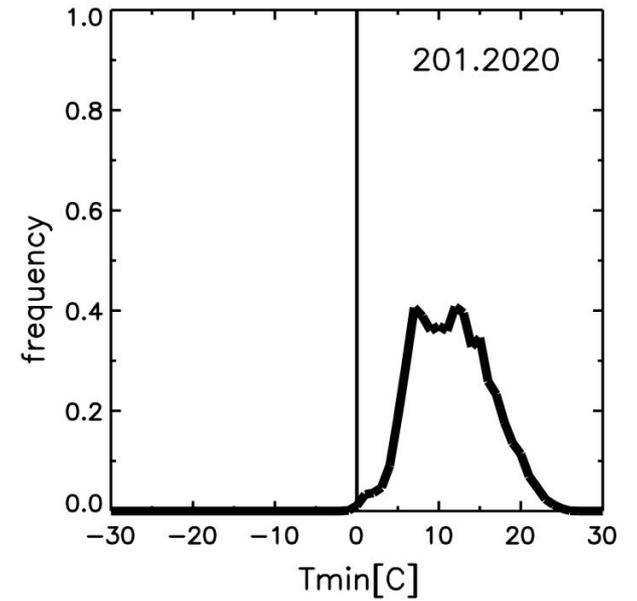
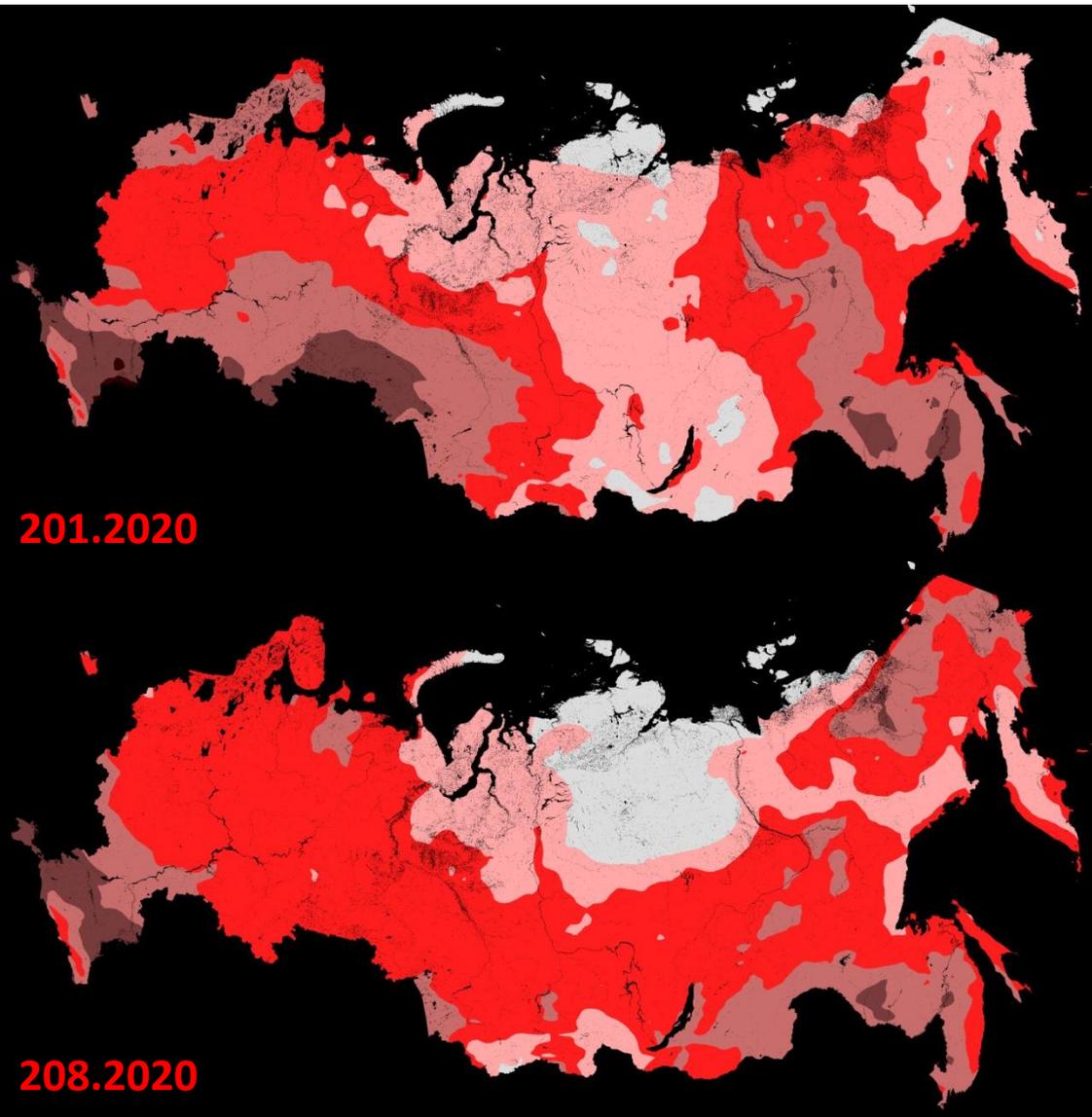
Входные данные алгоритма GPP: MCD15 FPAR и IKI FPAR



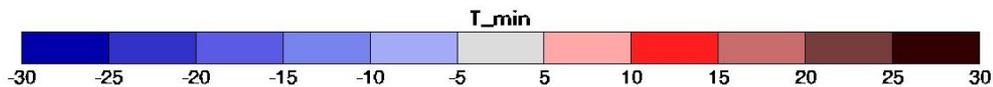
Fill value No data



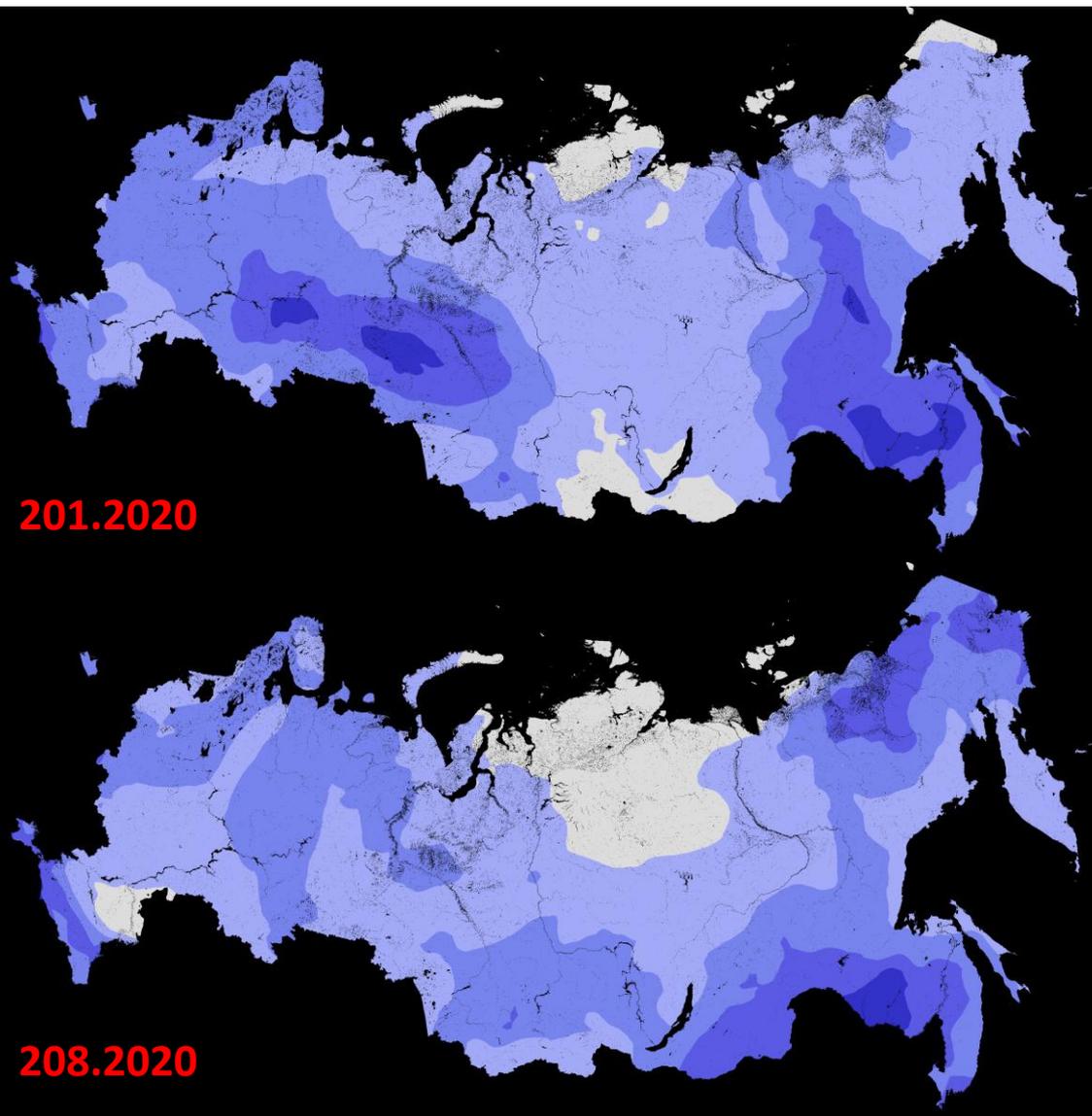
Входные данные алгоритма GPP: MERRA2 Tmin



Fill value No data

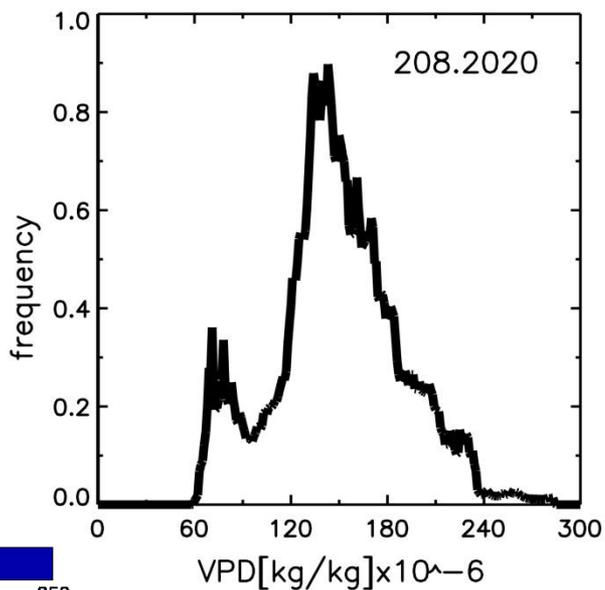
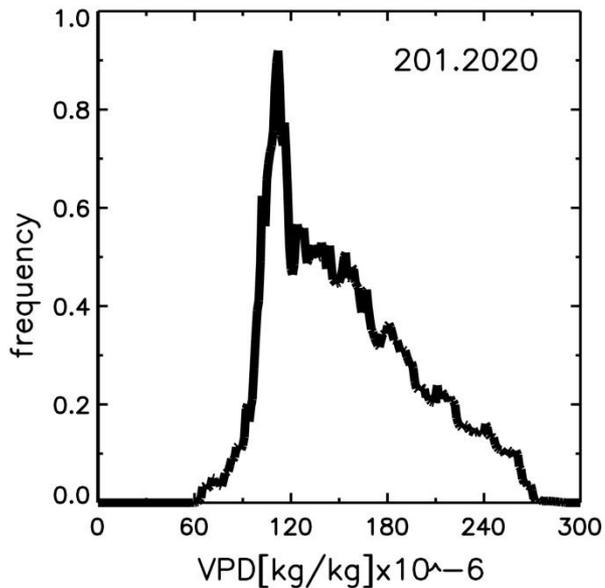


Входные данные алгоритма GPP: MERRA2 VPD

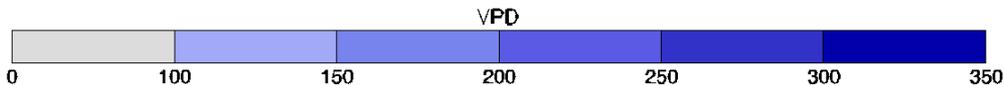


201.2020

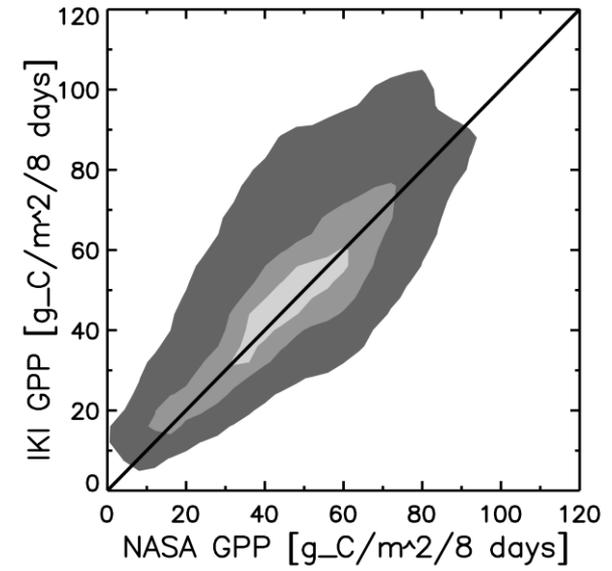
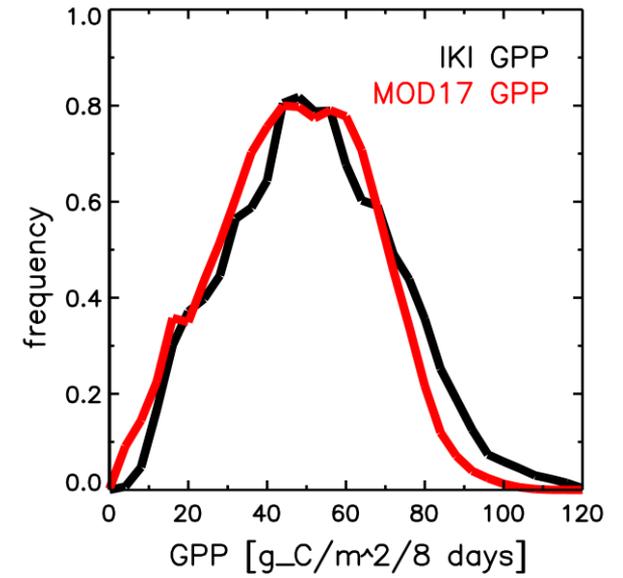
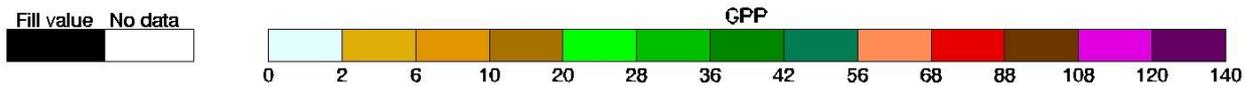
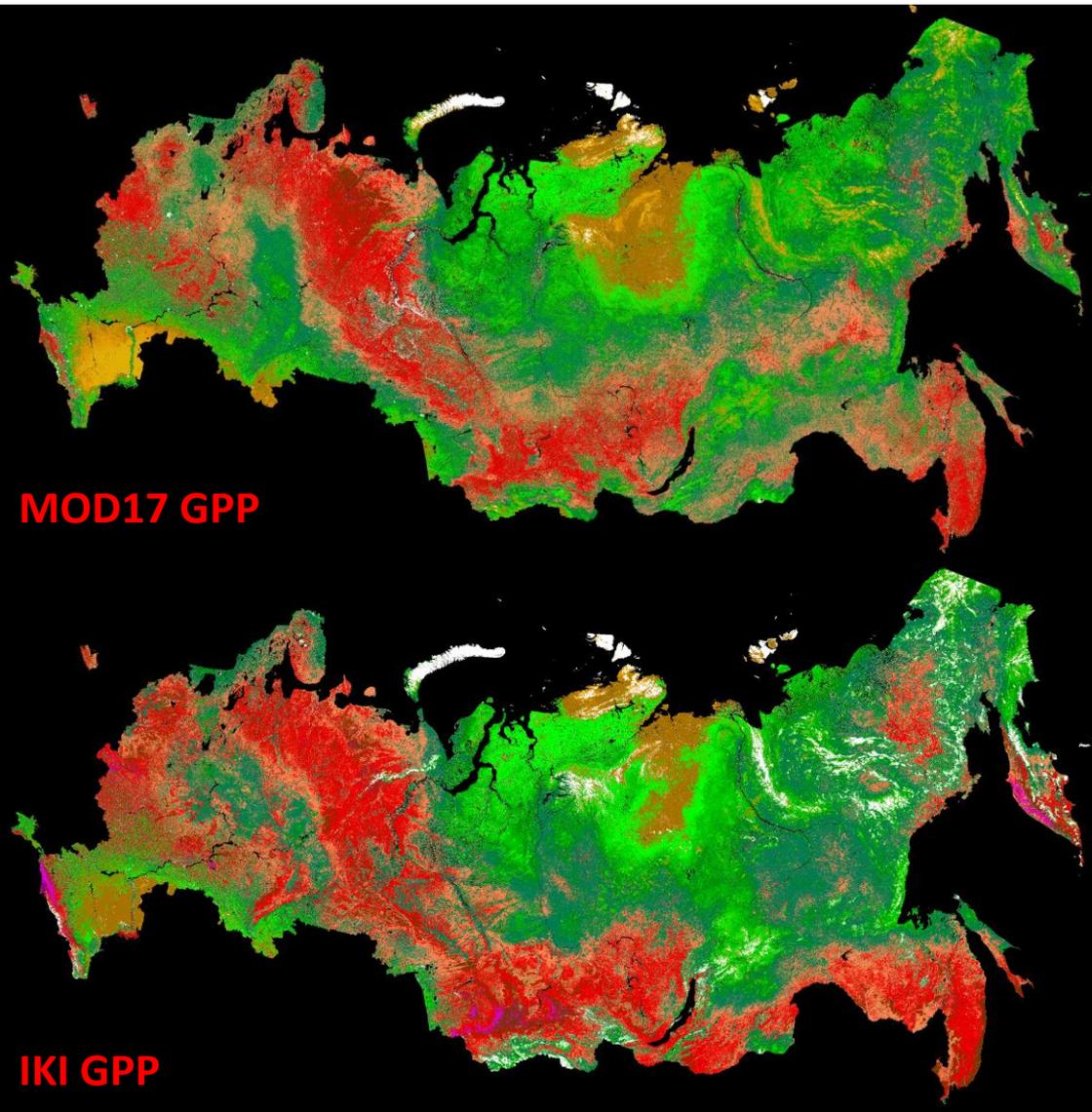
208.2020



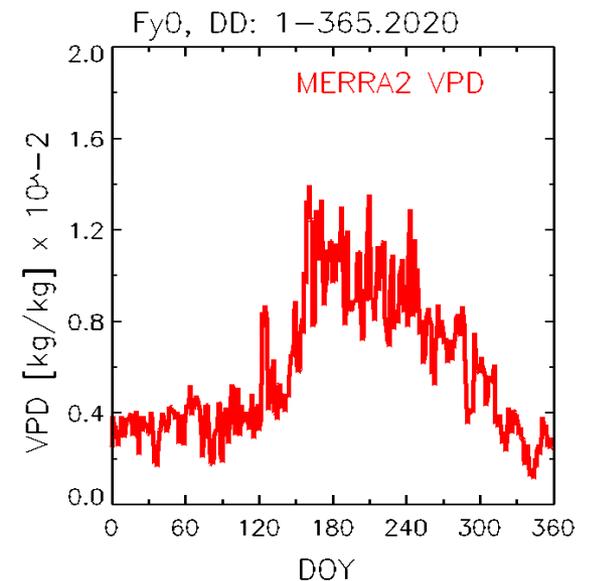
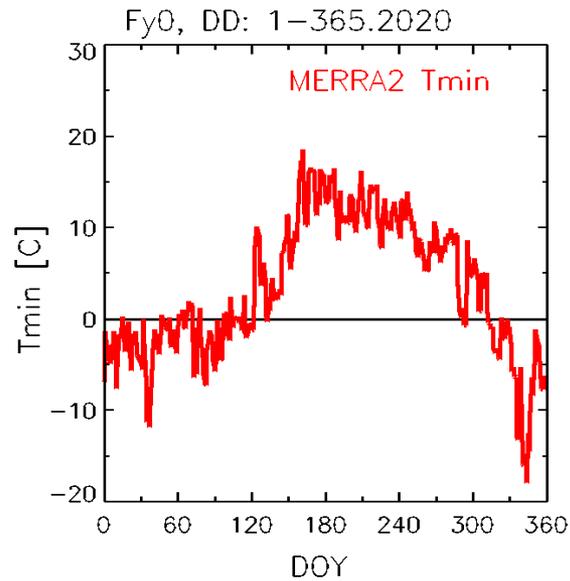
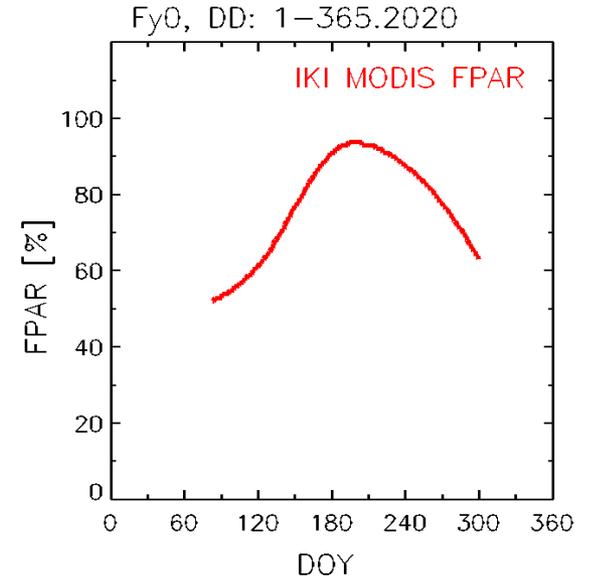
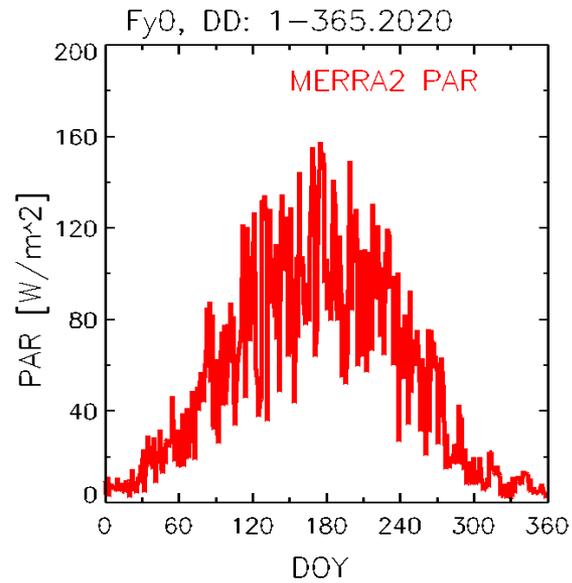
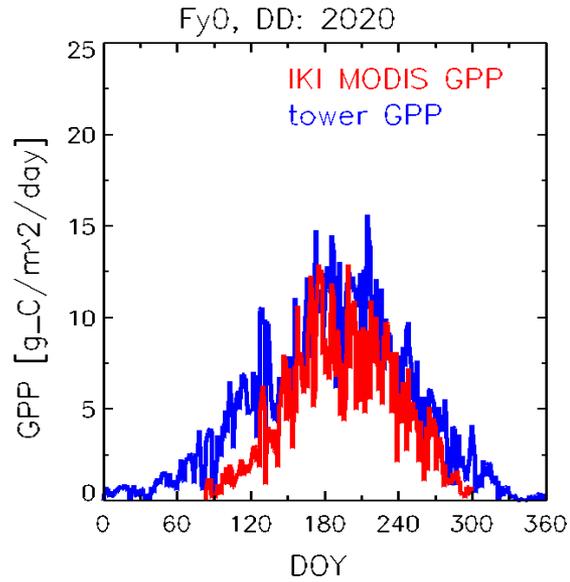
Fill value No data



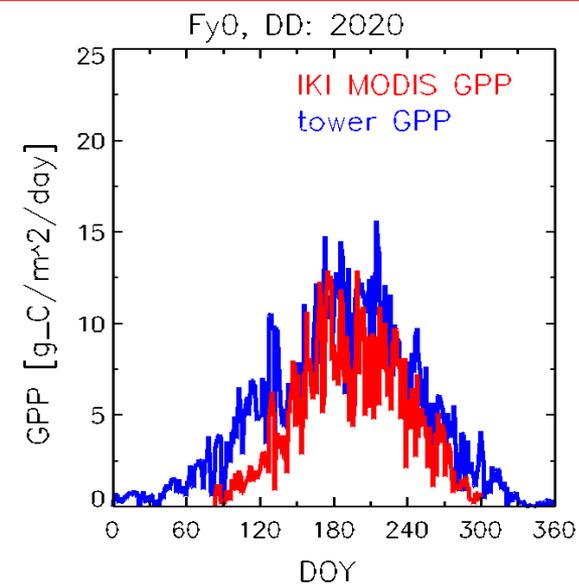
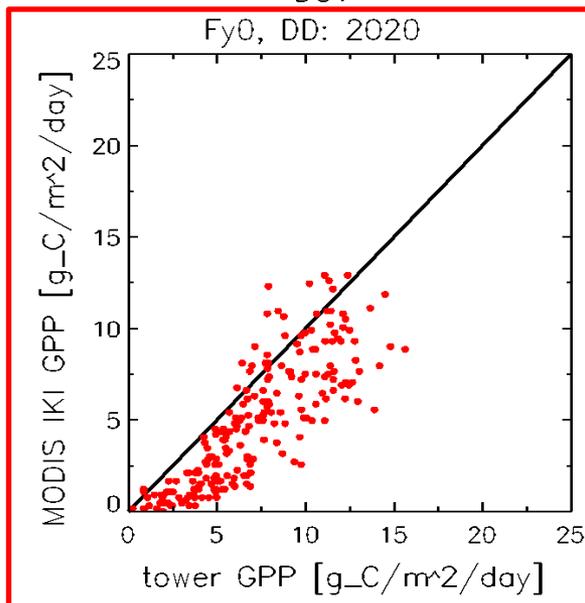
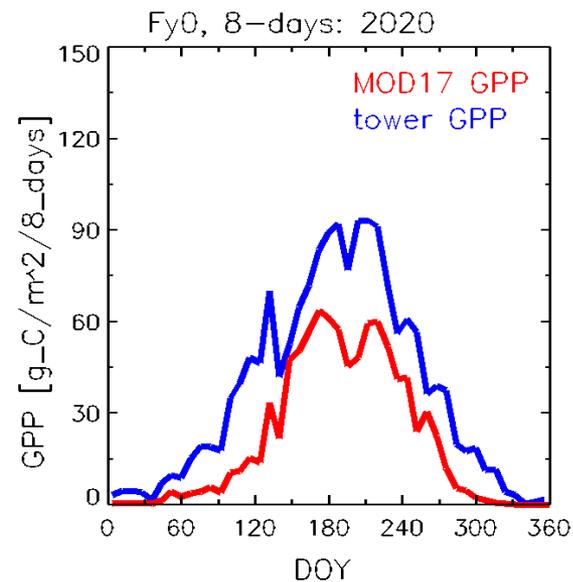
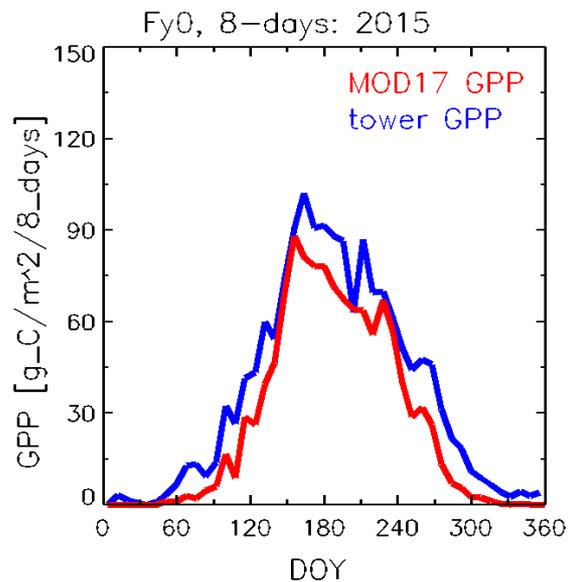
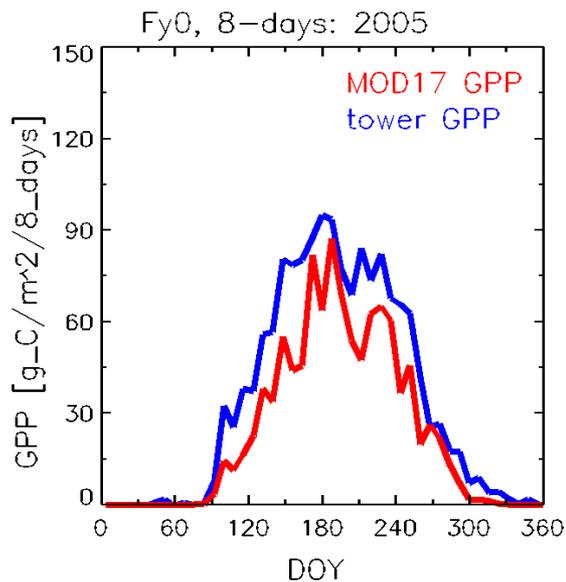
Выходные данные алгоритма GPP: MOD17 GPP и IKI GPP



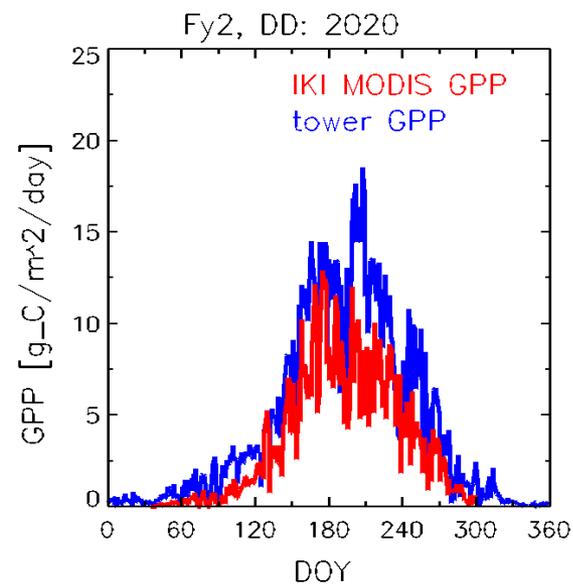
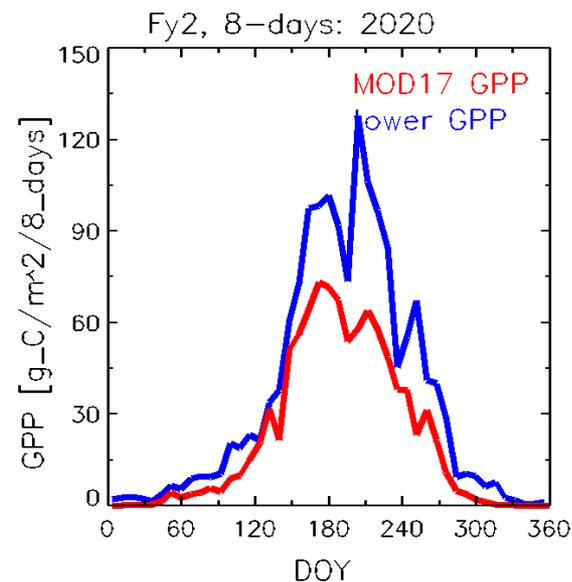
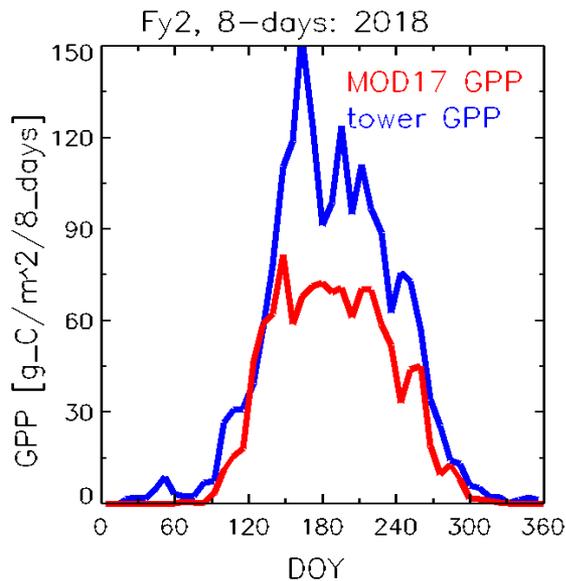
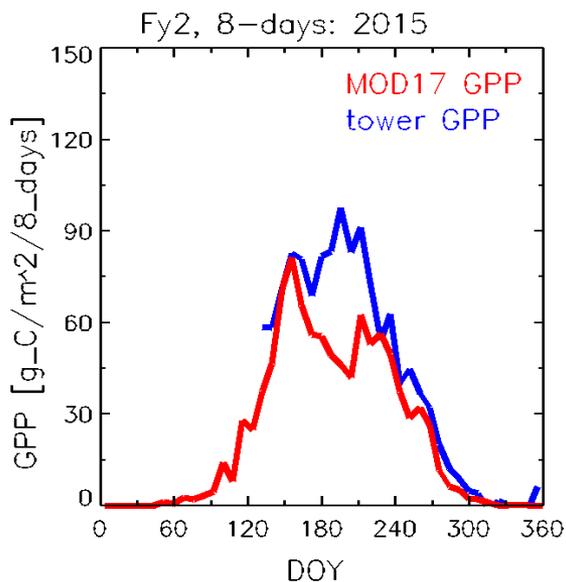
Сезонная динамика данных ДЗЗ.климата для оценки GPP по станции Федоровское-0



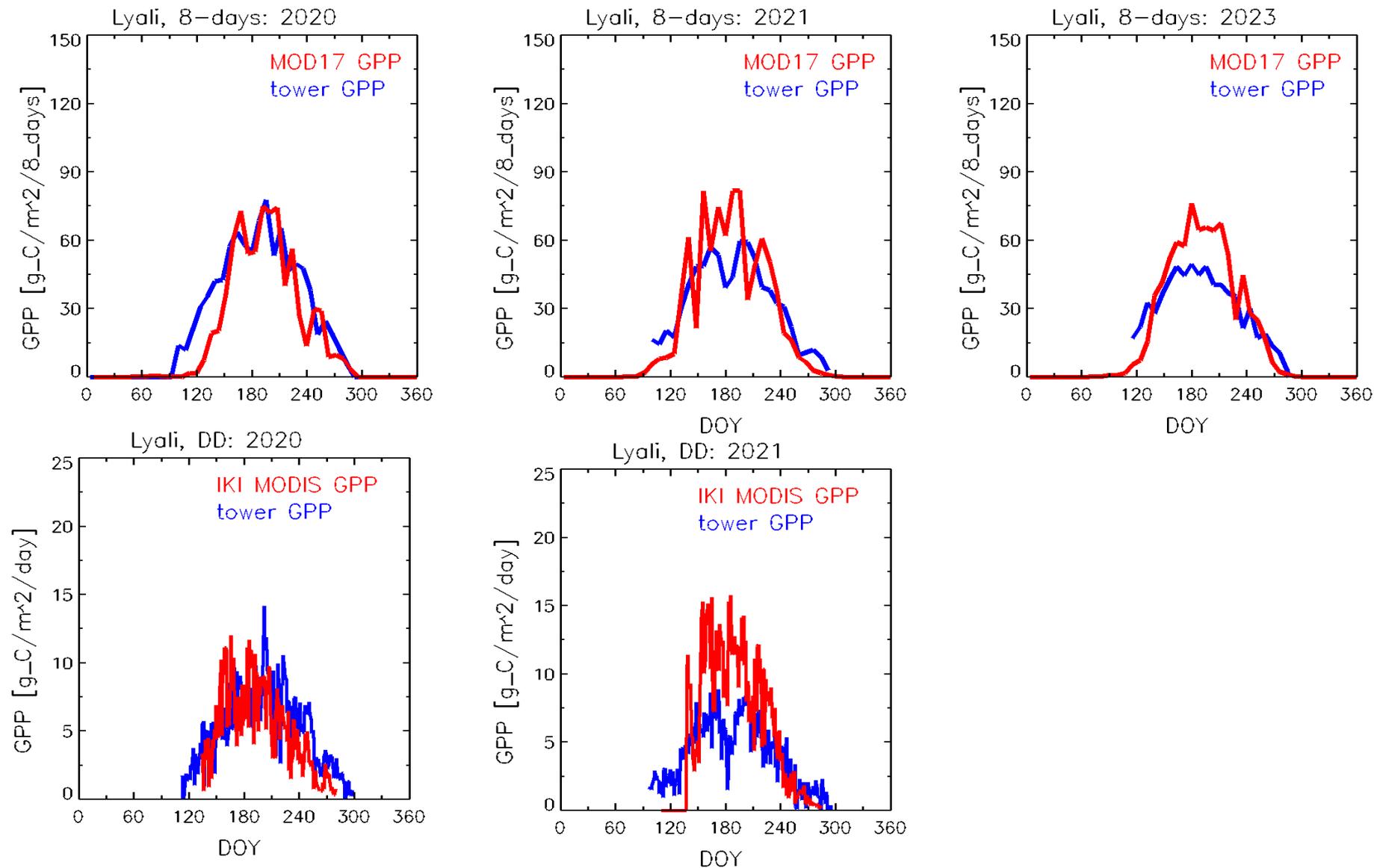
Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и наземным измерениям на станции Федоровское-0



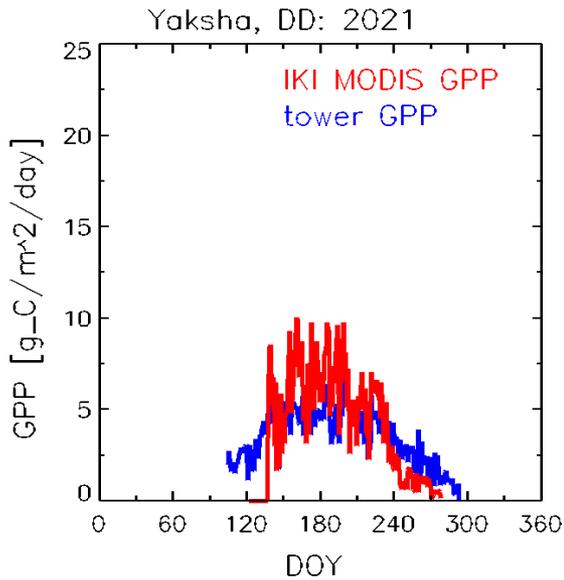
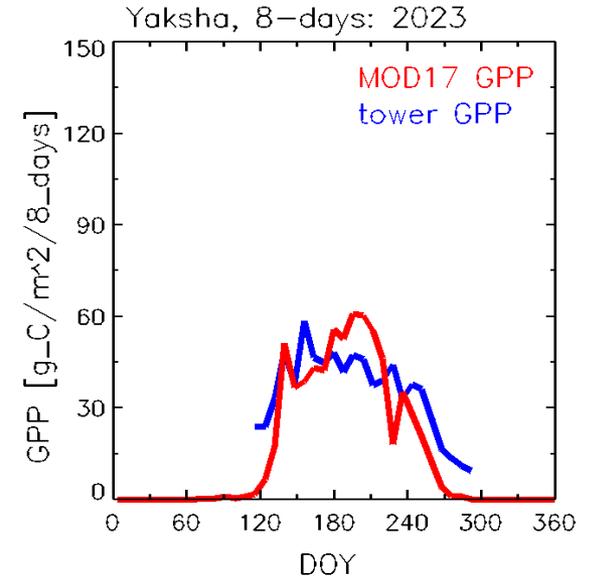
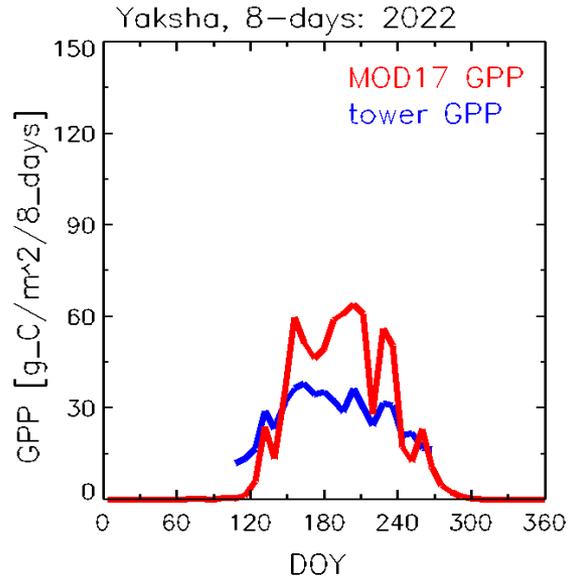
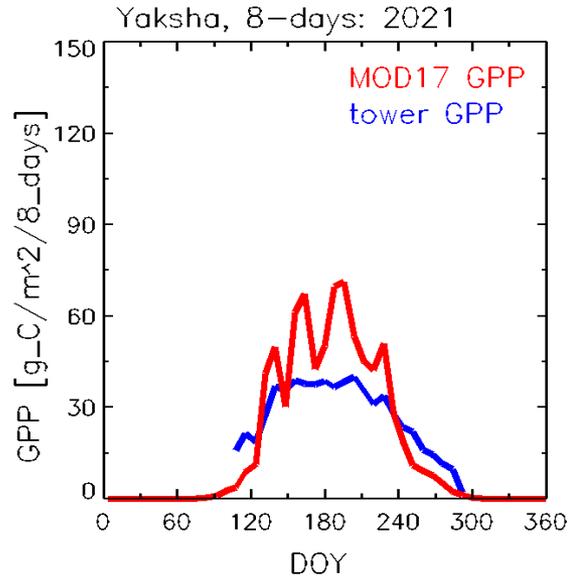
Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и наземным измерениям на станции Федоровское-2



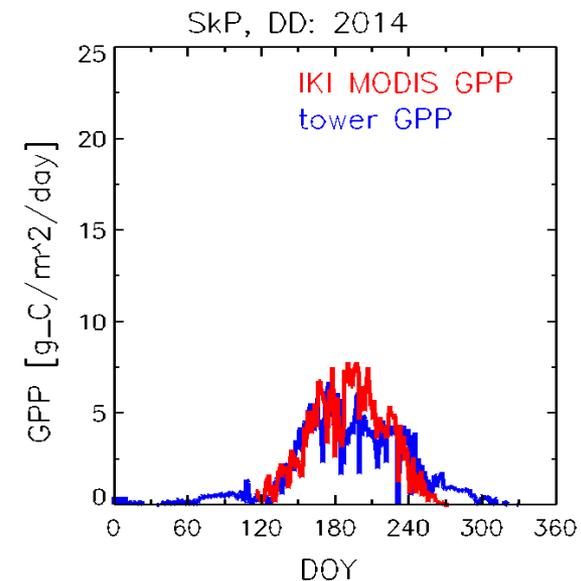
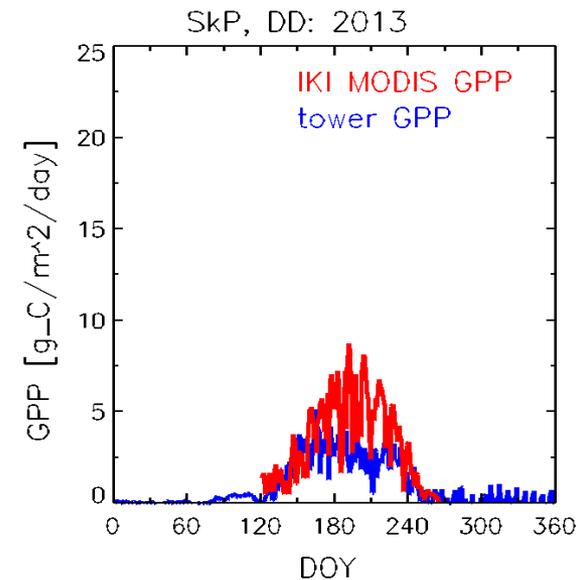
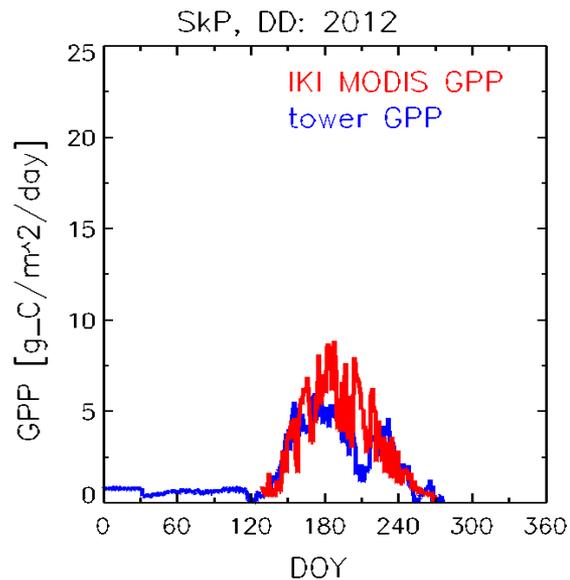
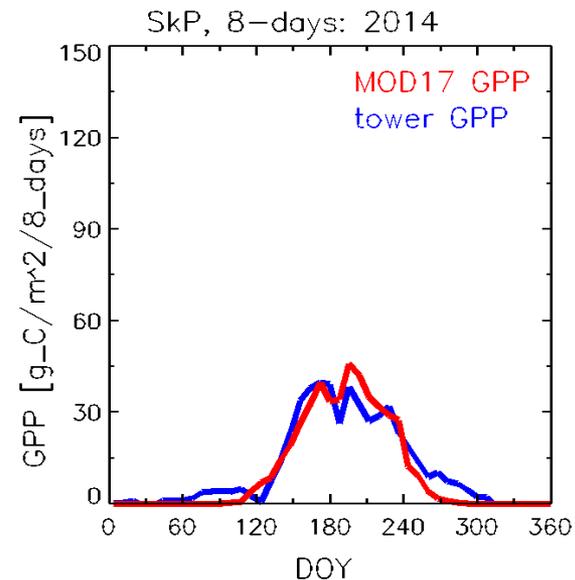
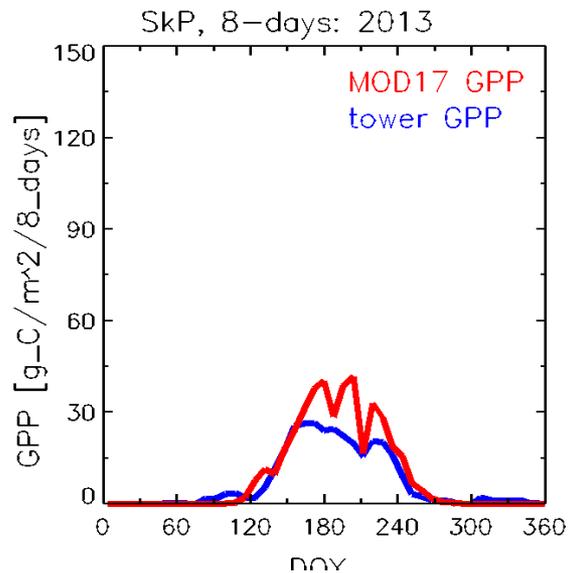
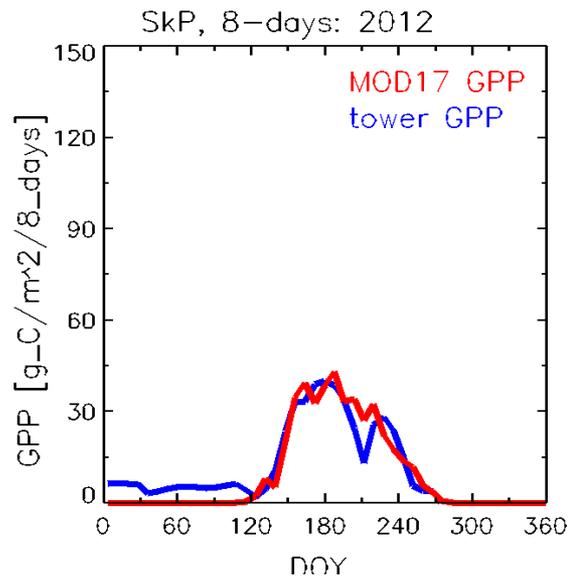
Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и наземным измерениям на станции Ляли



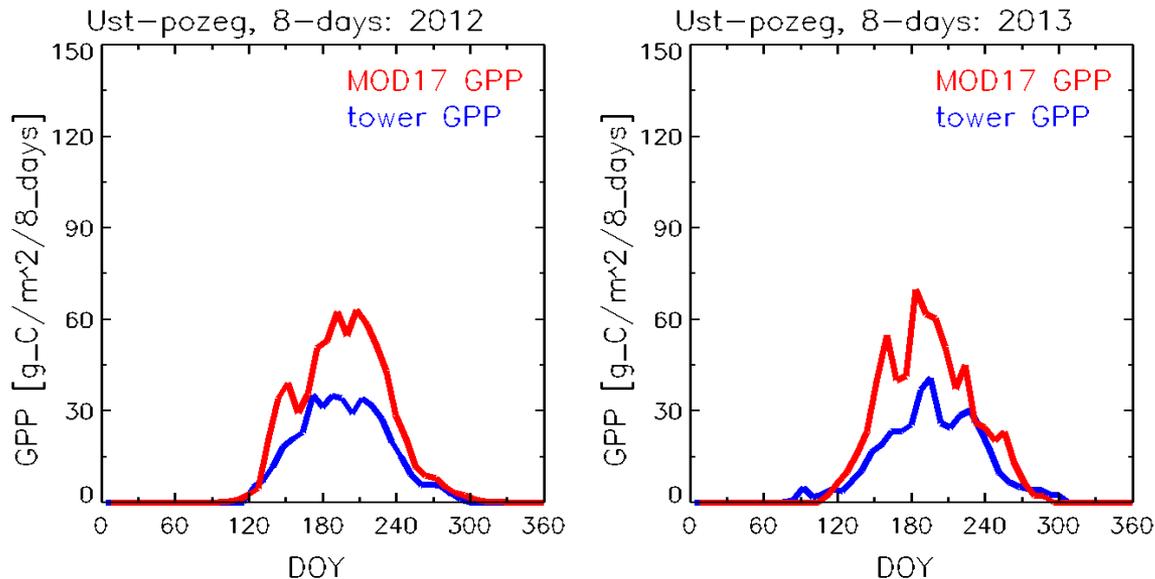
Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и наземным измерениям на станции Якша



Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и наземным измерениям на станции Спасская Падь



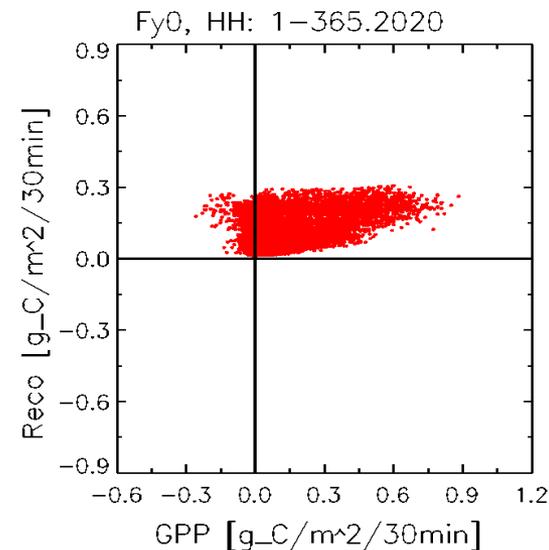
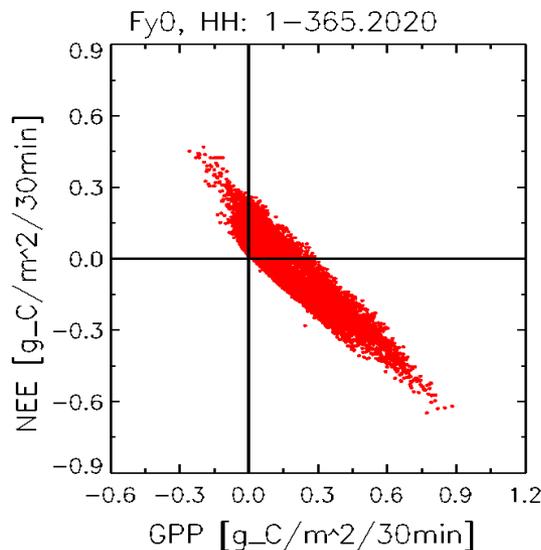
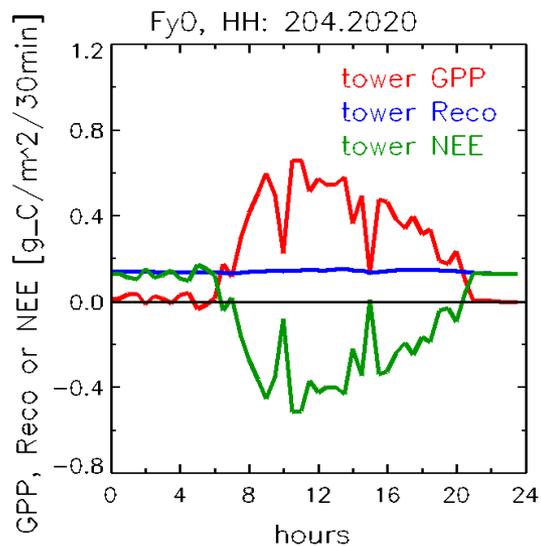
Сезонная динамики GPP по данным ДЗЗ и измерениям на станции Усть-Пожег



Завышение GPP по данным болотам не является доказательством что данная проблема возникает для всех болот. Требуется больше данных по болотам.

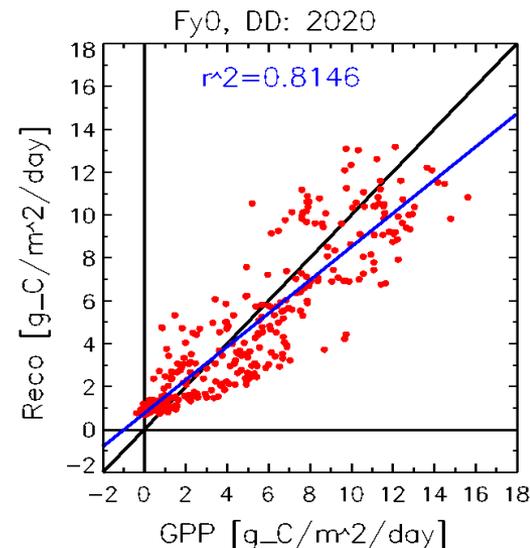
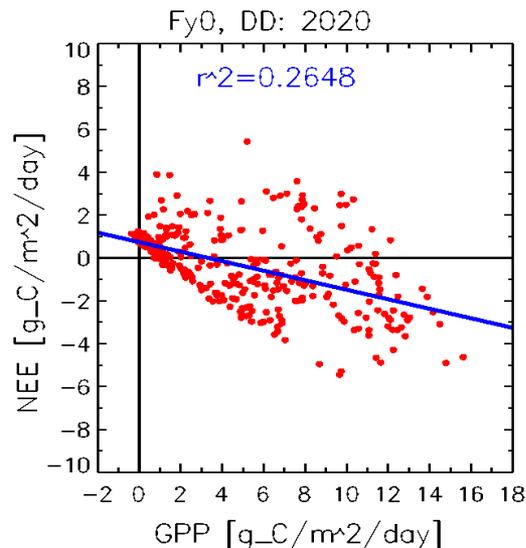
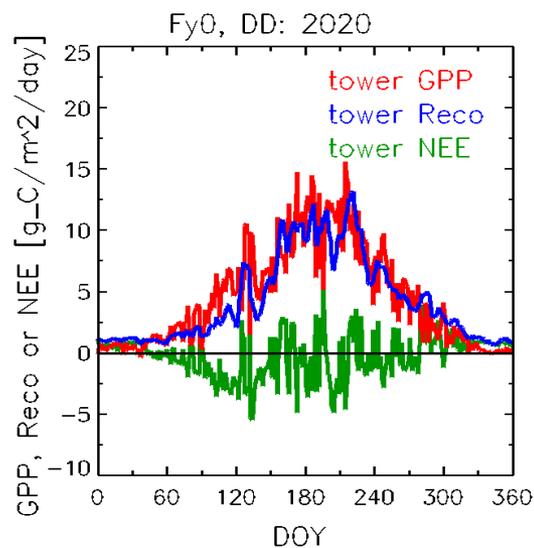
В целом по станциям наблюдается достаточно хорошая корреляция между сезонными профилями GPP и измерениями на станциях, с разницей около 20-30%

Анализ данных станции Федоровское-0



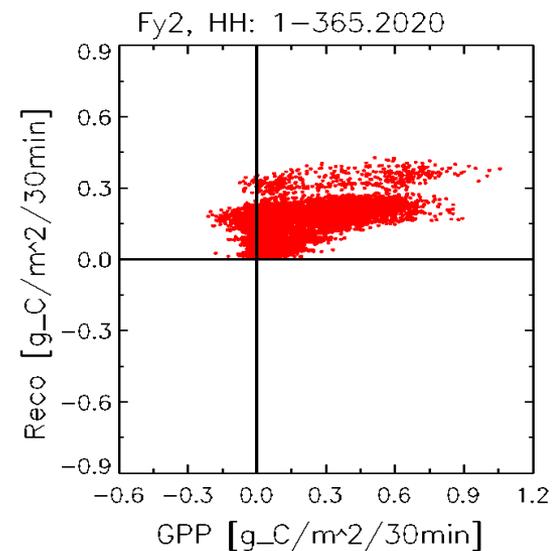
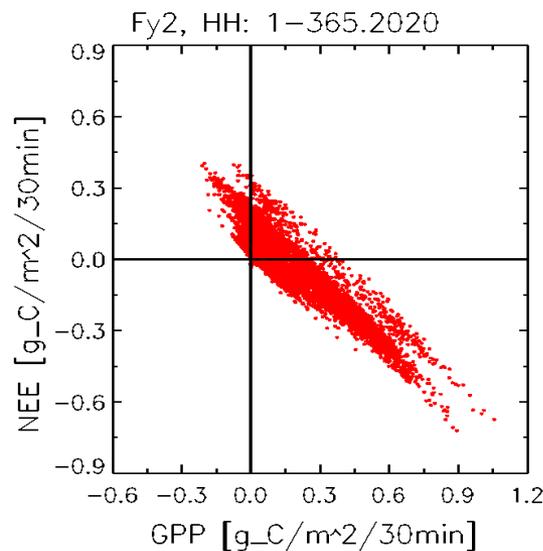
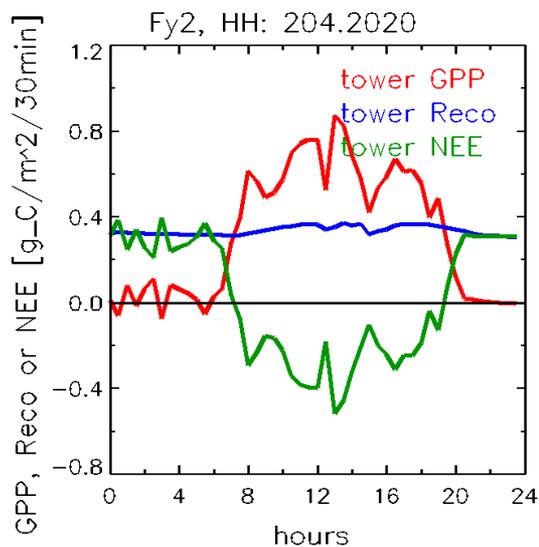
HH

DD



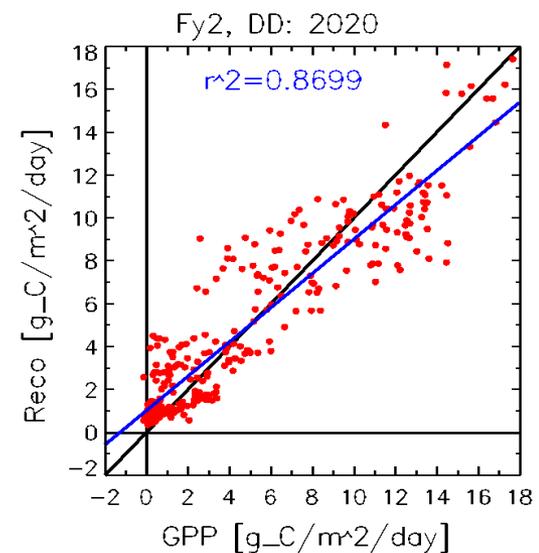
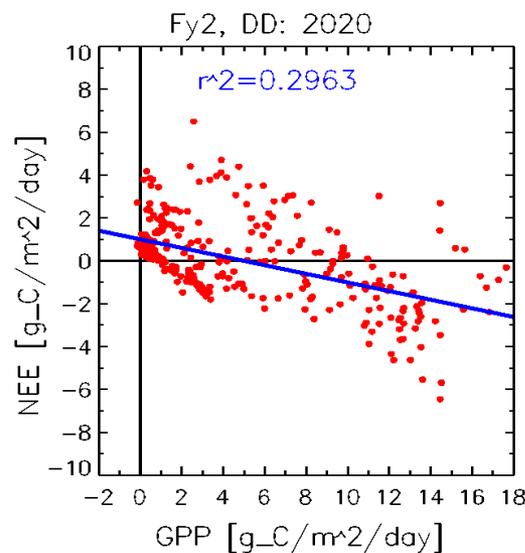
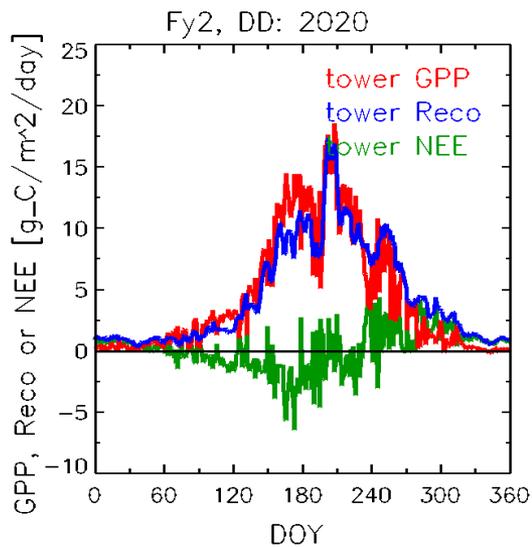
- 1) В почасовых данных выражена корреляция GPP:NEE, а в суточных GPP:Reco
- 2) Суточная динамика Reco отсутствует- она появляется в сезонном цикле
- 3) Чем ближе Reco и GPP к 1:1 линии, тем ниже NEE

Анализ данных станции Федоровское-2



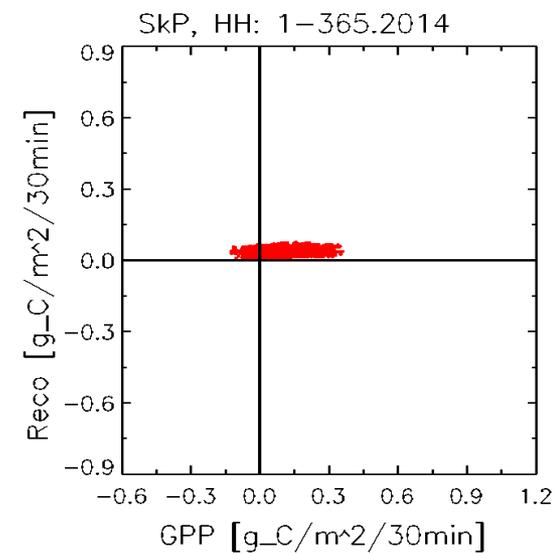
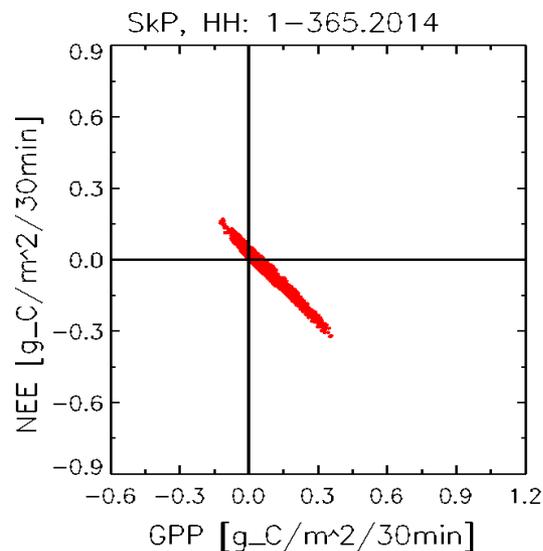
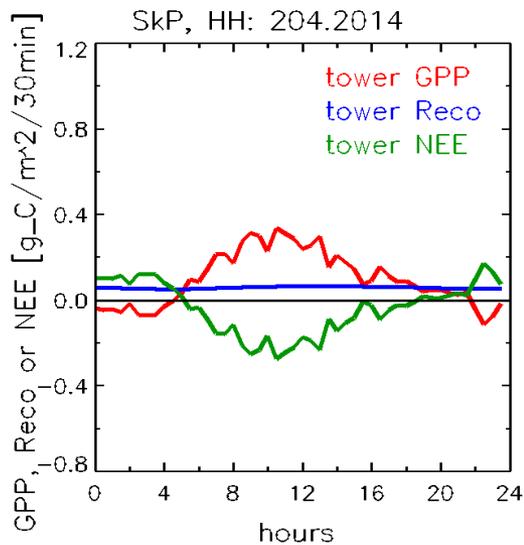
HH

DD



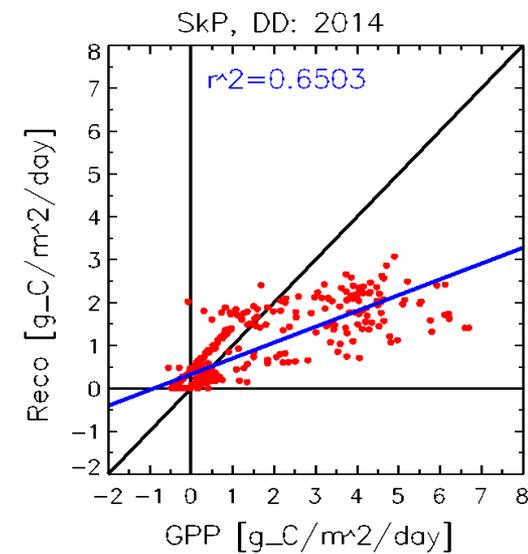
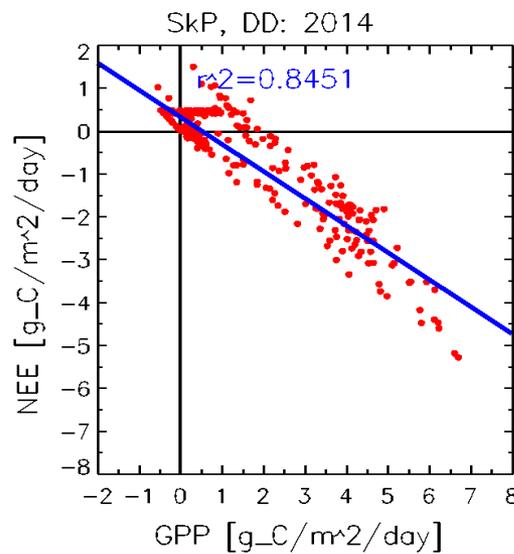
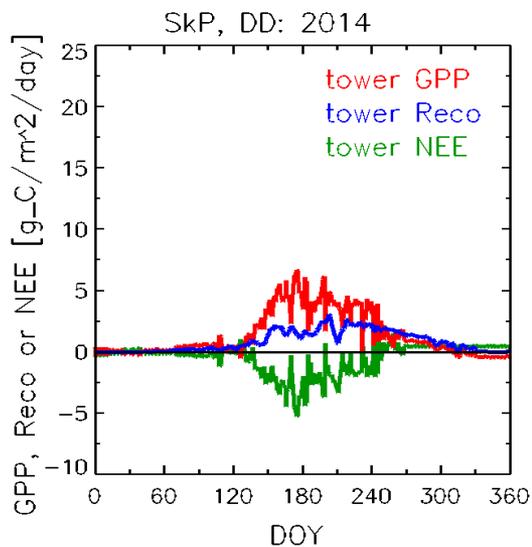
Похожая ситуация что и для Федоровского-0, только дыхание выше

Анализ данных станции Спасская Падь



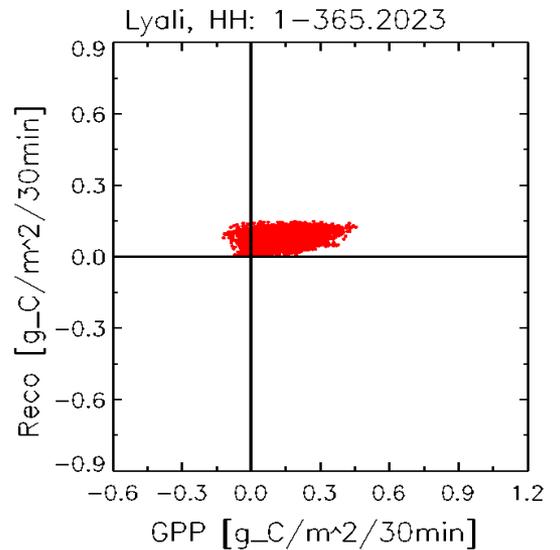
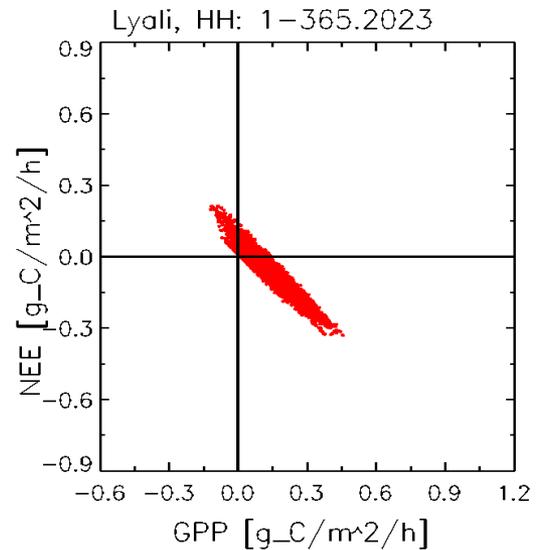
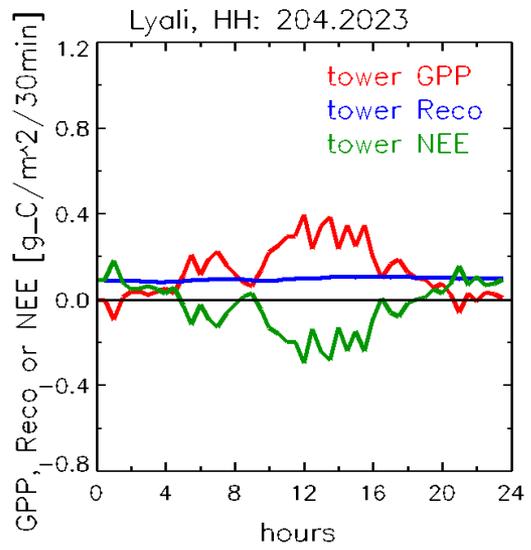
HH

DD



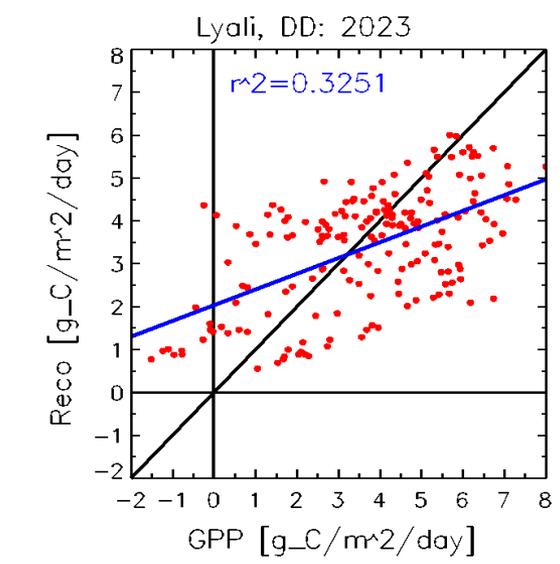
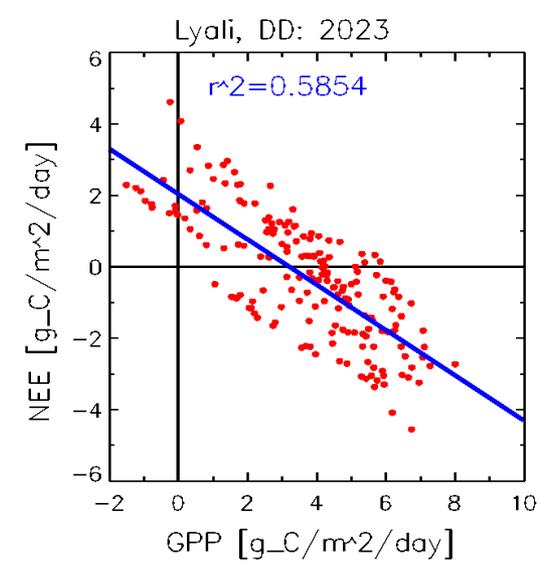
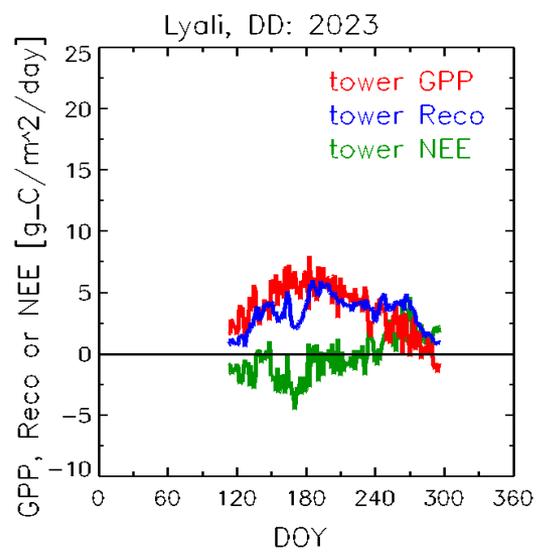
Сезонный профиль дыхания низкий по сравнению с GPP поэтому угол наклона GPP-Reco сильно отклоняется от 1:1 линии

Анализ данных станции Ляли

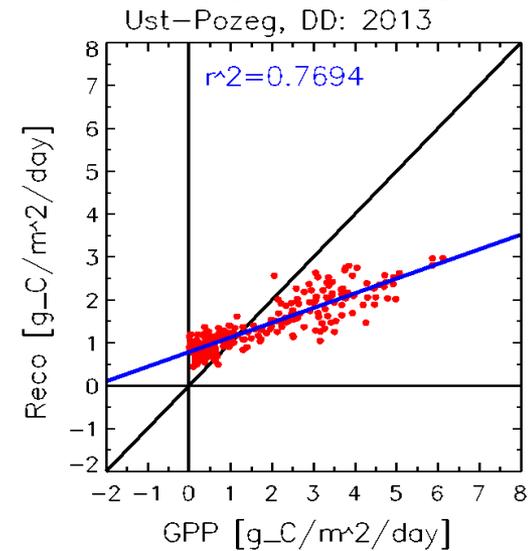
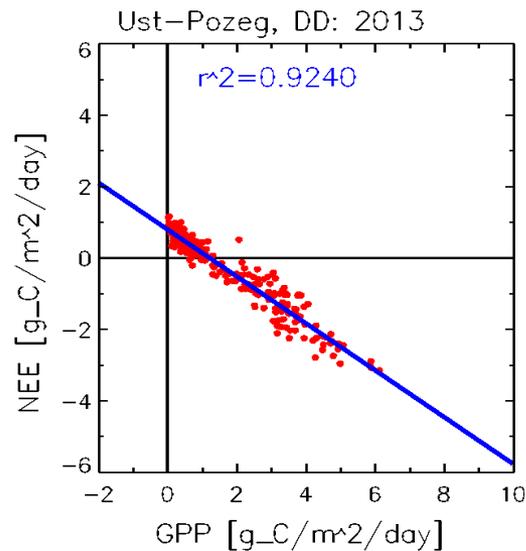
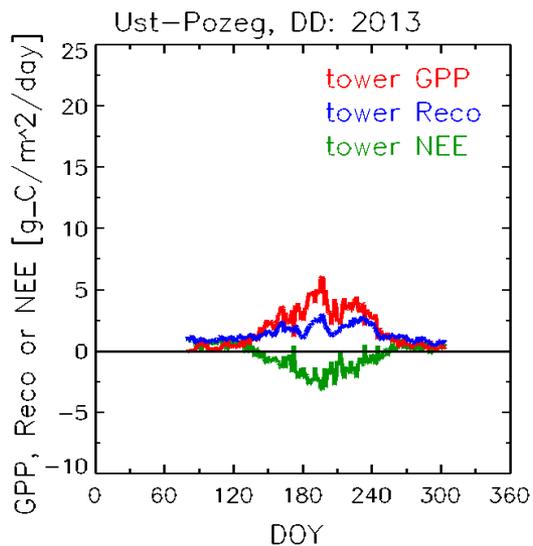
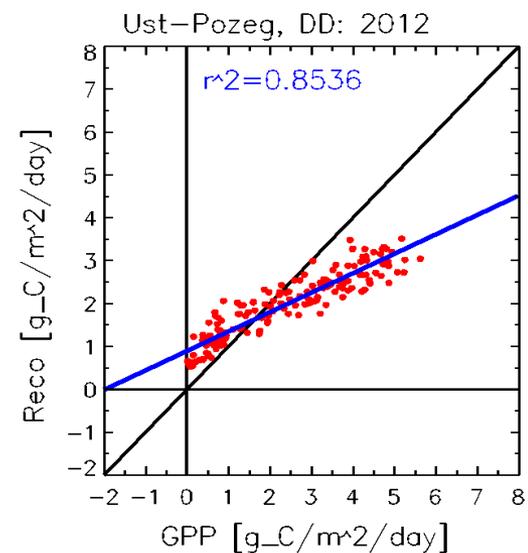
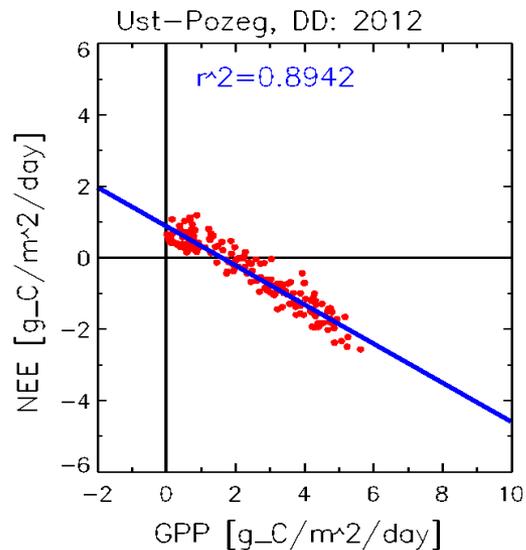
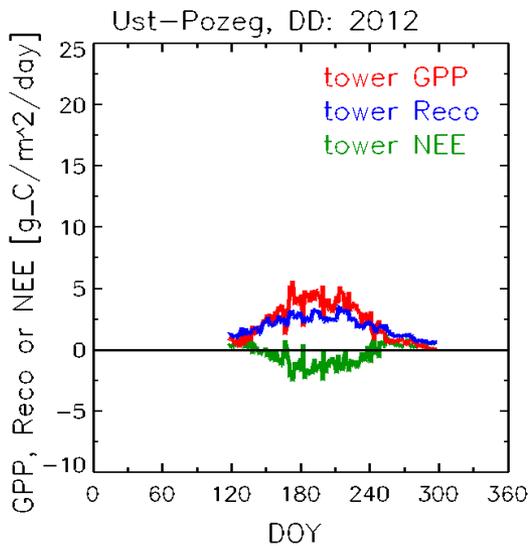


HH

DD



Анализ данных станции Усть-Пожег



DD
DD

Корреляция между годовыми R_{eco} и GPP по данным мировой литературы

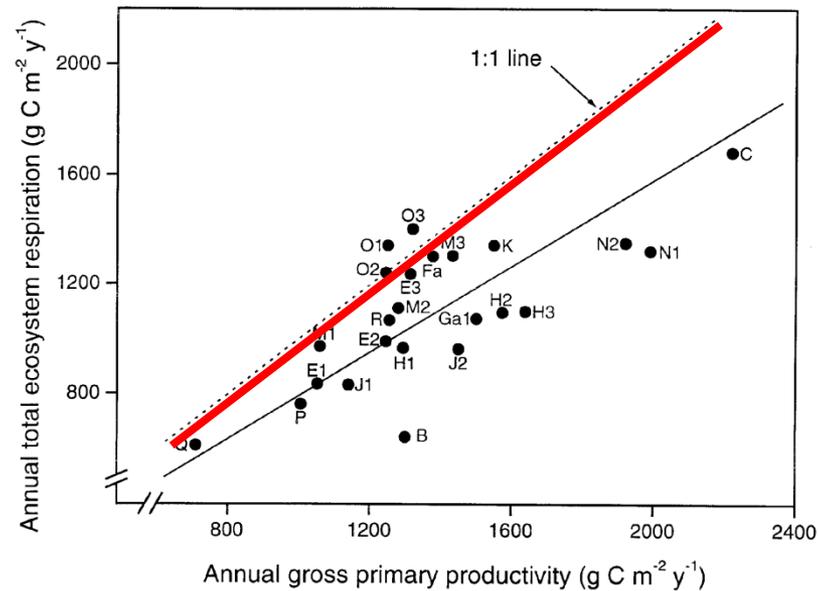


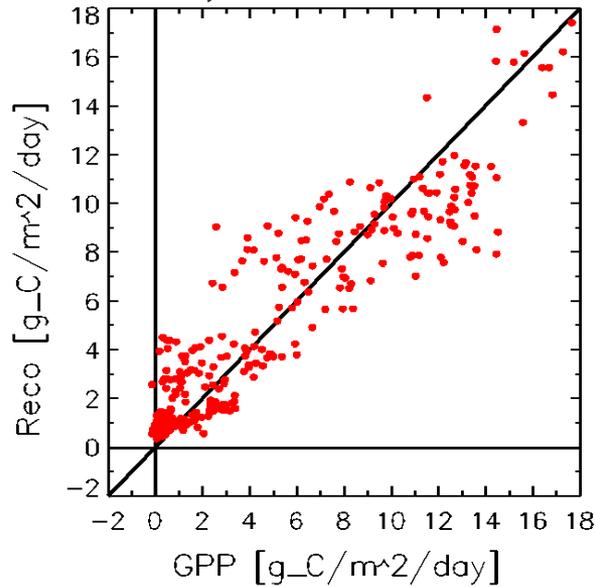
Fig. 4 in Janssens et al (2001): Annual total ecosystem respiration vs. annual gross primary productivity. Site codes should be interpreted as follows: capital letters indicate different sites, lower case letters refer to different species or age classes within the same site, numbers following letters indicate different measurement years. The dotted line represents the 1 : 1 line, the solid line gives the best linear fit

Janssens et al (2001). Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 7, 269-278

Линейная зависимость также демонстрируется в следующих работах: Laslop et al (2010), Reichstein et al (2007), Wang et al, (2008)

Алгоритм оценки экосистемного дыхания (Reco)

Fy2, DD: 2020



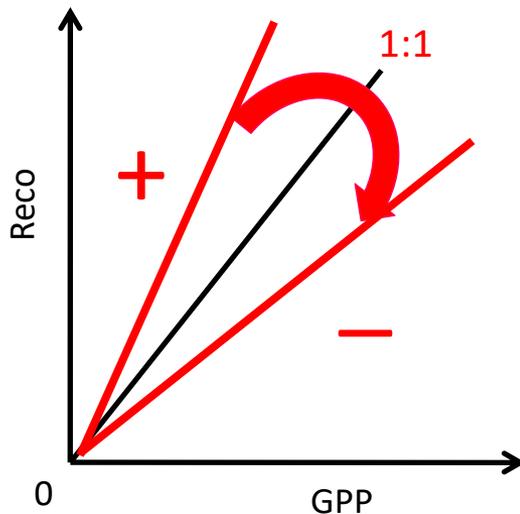
- 0) Входными данными являются сезонные профили GPP и климата (наземной температуры)
- 1) Основываясь на данных станции предположим линейную связь между $\text{Reco}(t)$ и $\text{GPP}(t)$,

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

- 2) Параметризуем Reco как функцию неземной температуры T_{soil} (Lloyd & Taylor, 1994)- подход используемый в ночном алгоритме FLUXNET (Reichstein et al., 2005),

$$\text{Reco}(t) = R \cdot \exp \left[E_0 \left\{ \frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T_{\text{soil}}(t) - T_0} \right\} \right]$$

где $T_{\text{ref}}=10\text{C}$, $T_0=-46.02\text{C}$, R и E_0 - свободные параметры.



- 3) Комбинируем (1) и (2), рассчитываем нелинейную регрессию $\text{GPP}(t) : T(t)$ параметры α , β , E_0 и R, затем рассчитываем сезонный профиль $\text{Reco}(t)$ и далее NEE(t)

Угол отклонения линии регрессии от 1:1 линии регулирует знак и величину нетто экосистемного обмена (NEE)

Заключение

- 1) Алгоритм IKI GPP/NEE/NPP основан на теоретической базе алгоритма NASA MOD17. Только часть алгоритма, касающаяся расчета GPP была адаптирована. Расчет экосистемного дыхания (и нетто характеристик) в MOD17 выполнен не в полном объеме и со значительными упрощениями.
- 2) Анализ данных станций сети RuFlux показывает
 - А) достаточно хорошую точность оценки GPP на основе алгоритма MOD17 (~20-30%)
 - Б) существование линейной связи между экосистемным дыханием Resco и GPP
- 3) Сформулирован (предварительно) алгоритм расчета NEE на основе ночного алгоритма FLUXNET и эмпирической зависимости Resco и GPP

Авторы выражают благодарность dr. Arthur Endsley (University of Montana, US) за предоставленный код алгоритма MOD17, обсуждение его теоретических основ и реализации в ПО

Просьба, всем участникам консорциума “Углерод-Э” предоставить данные GPP/NEE для разработки ИКИ алгоритма

Проектная поддержка работы

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (госрегистрация № 124060500032-7). Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Лупян Е.А., и др. (2019). Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С.151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.