

Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании данных глобальных продуктов ДЗЗ

Матвеев А. М.

Барталев С. А.

Двадцать первая международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
13–17 ноября 2023 г., ИКИ РАН, Москва

Разделы:

- Использованные продукты и методика их обработки: [сл. 3–4](#)
- Доля России в глобальной эмиссии углерода (С) и углеродсодержащих компонентов: [сл. 5–8](#)
- Эмиссия углерода (С) в России за период наблюдений: [сл. 9–10](#)
- Скаттерограммы корреляции оценок эмиссии С различных методик:
 - весь год: сл. [11–13](#)
 - апрель-май: сл. [14–16](#)
 - июль-август: сл. [17–19](#)
- Карты:
 - Суммарные эмиссии С за период макс. пересечения методик (2003–2021 гг.): сл. [20–27](#)
 - Усред. эмиссии С за весь период наблюдений: QFED и GFED, апр-май, июл-авг, окт: сл. [28–31](#)
 - Годовые эмиссии С за годы максимальной пожарной активности (QFED): сл. [32–36](#)
 - Выводы, пересечение с картой стабильных термоаномалий по VIIRS Nightfire: сл. [37–38](#)
- Региональная статистика:
 - Карты (среднегодовые; в весенний и летний период): сл. [39–42](#)
 - Статистика за весь период: сл. [43–44](#)
 - Статистика по месяцам: сл. [45](#)
 - Статистика по годам: сл. [46–49](#)
 - Региональная статистика: наблюдения и выводы: сл. [50](#)

Использованные глобальные продукты ДЗЗ

Продукт	Сенсоры	Период и врем. разрешение	Пространст. разрешение	Методика подсчёта	Эмиссии	Ссылка на данные
GFAS v1.2 [Kaiser et al., 2012]	MODIS	2003–н. вр. день	0.1°	Инвентаризация, FRP	C, CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +32 поллютанта	https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-fire-emissions-gfas?tab=form
GICC [Mieville et al., 2010]	ATSR и VIRS	1997–2005 месяц	1°	Инвентаризация, FRP и площ. гарей	CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +16 поллютантов	https://eccad.sedoo.fr/#/data
FINN v2.5 [Wiedinmyer et al., 2023]	MODIS VIIRS	2002–2021 (MODIS) 2012–2023 (VIIRS) день	0.1°***	Инвентаризация, FRP	CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +22 поллютанта	https://rda.ucar.edu/datasets/ds312.9/dataaccess/
FEERv1.0-GFAS1.2 [Ichoku, Ellison, 2014]	MODIS	2003–наст. вр. день	0.1°	Инвентаризация, FRP; аэрозоли по регрессии FRP vs AOT***	C, CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +24 поллютанта	https://feer.gsfc.nasa.gov/data/emissions/
QFED v.2.5r1 [Darmenov, da Silva, 2015]	MODIS	2000–2022 день*	0.1°	Инвентаризация, FRP; аэрозоли по FRP vs AOT	CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +12 поллютантов	https://portal.nccs.nasa.gov/datastore/ies/aerosol/emissions/QFED/v2.5r1/0.1/QFED/monthly/
GFED v4.1s [van der Werf et al., 2017]	ATSR и VIRS (1997–2001) MODIS (с 2001)	1997–наст. вр. месяц**	0.25°	Инвентаризация, площадь гарей	C; сгор. биомасса → коэф. для CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC +34 поллютанта	https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/

* — для расчётов использованы ежемесячные данные; доступны данные за 03.2000–01.2023 гг.

** — данные GFED v4.1s с 2017 года считаются бета-версией

*** — для FINN также существуют NRT (оперативные) данные с простр. разрешением 1 км в виде текстовых файлов

Для инвентарных методик используется методика Seiler-Crutzen, 1980 (M_S — эмиссия компонента S):

$$M_S = ABf_S\beta,$$

где A — площадь пожара, B — плотность распределения биомассы, f_S — доля поллютанта в биомассе, β — % сгор. биомассы

$$M_S = \alpha E_S FRE,$$

где M_S — эмиссия вещества, α — эмпирический коэф. FRE vs масса сгор. биомассы, E_S — коэф. эмиссии поллютанта

Методика обработки данных

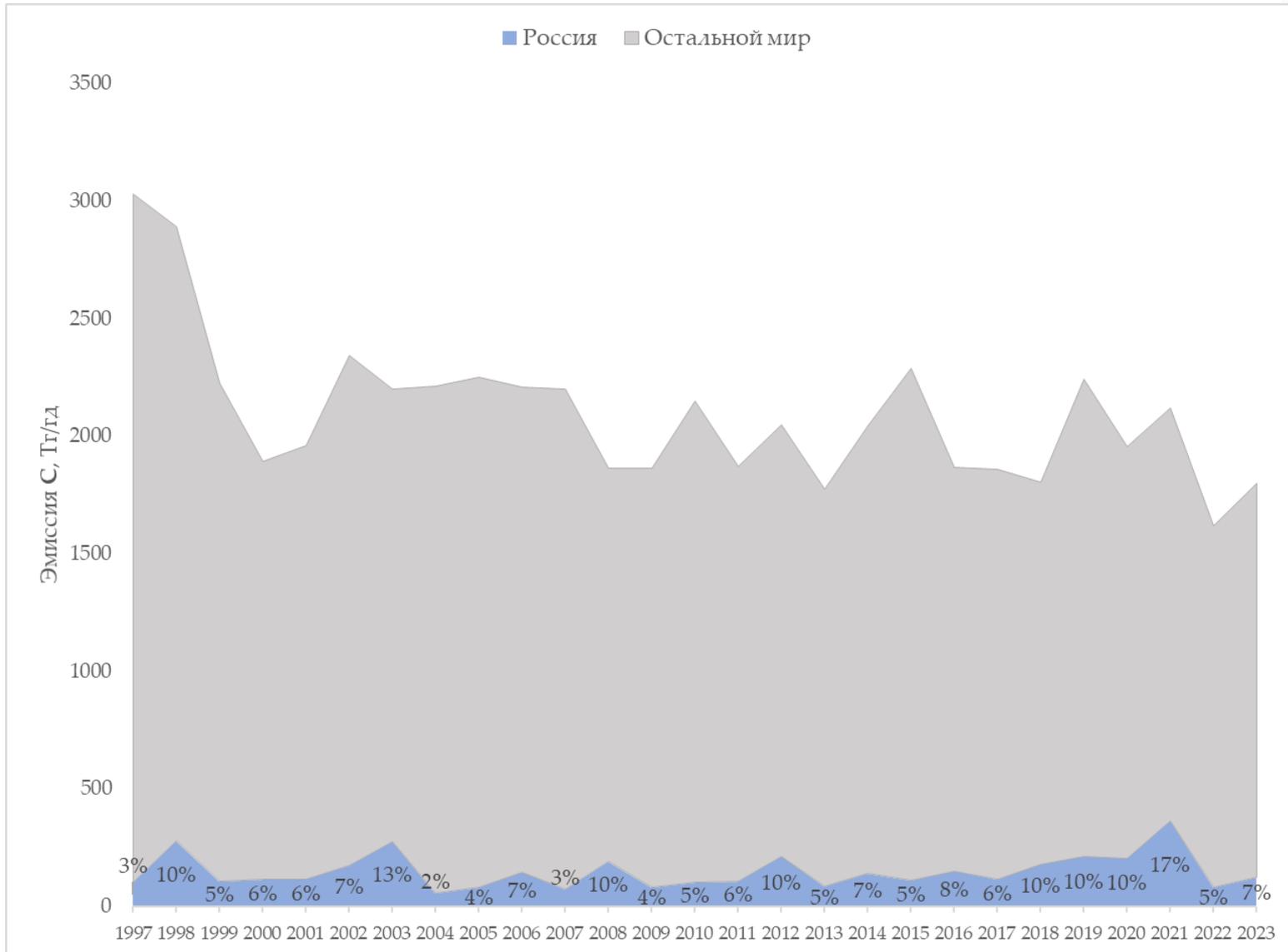
- Обработка данных выполнена на Python (пример обработки данных с применением R представлен в [Liu et al., 2020]). В случае наличия ежедневных наблюдений данные продуктов усредняются за месяц по ячейкам исходной сетки алгоритма.
- В большинстве методик исходные данные предоставляются в виде эмиссии по площади и времени ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$), по которой путём учёта площади ячейки сетки была рассчитана масса эмиссии.
- По аналогии с GFAS v1.2 [Kaiser et al., 2012], для методик GICC, FINN v2.5 и QFED v2.5-r1 суммарная эмиссия **углерода** (C) была рассчитана на основе молярной доли эмиссий CO_2 , CO, CH_4 , OC и BC (органический и чёрный углерод):

$$M_C = \frac{12 \cdot M(\text{CO}_2)}{12 + 2 \cdot 16} + \frac{12 \cdot M(\text{CO})}{12 + 16} + \frac{12 \cdot M(\text{CH}_4)}{12 + 4 \cdot 1} + M(\text{OC}) + M(\text{BC}),$$

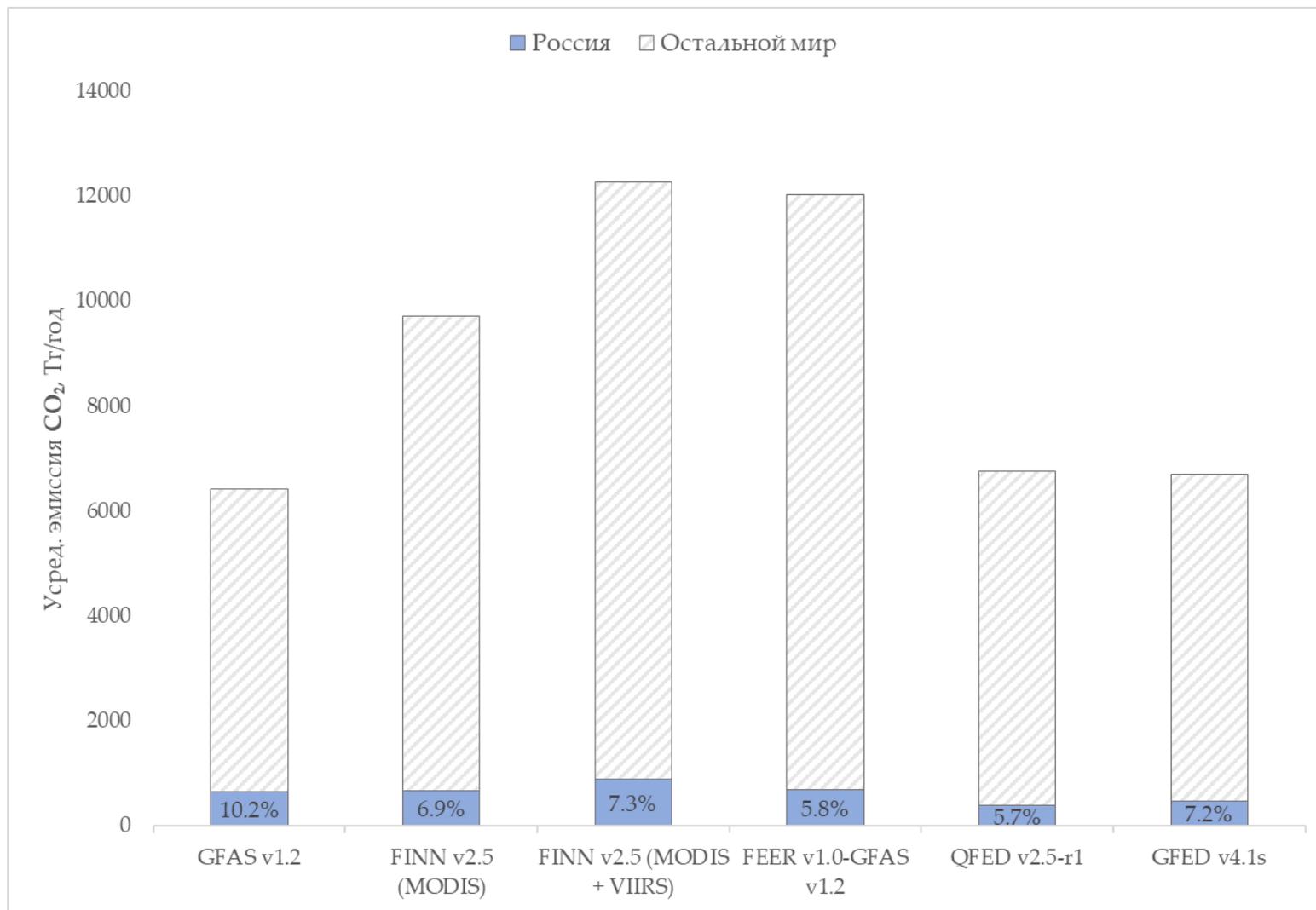
где M_C — эмиссия углерода, $M(\text{CO}_2/\text{CO}/\text{CH}_4/\text{BC}/\text{OC})$ — масса эмиссии соответств. компонента.

- Обработаны только данные по территории России. Используются только ячейки, центры которых расположены в границах страны.
- Ежемесячные данные были интегрированы (1) по всему периоду интереса с максимальным перекрытием методик (2003–2021 гг.), (2) по месяцам высокой пожарной активности и (3) по годам.
- В случае GICC исправлена ошибка, вызванная учётом високосного года, и разный формат координат долготы. Тем не менее, данные GICC отличаются высокой несогласованностью с GFED v4.1s.
- Дополнительно использованы контуры стабильных термоаномалий VIIRS Nightfire [Zhizhin et al., 2021], большинство из которых (76%) в России представлены газовыми факелами на объектах нефтегазовой промышленности. Были выделены ячейки, содержащие термоаномалии Nightfire.
- На картах представлено распределение массы эмиссий **углерода** по 10% перцентиллям.

Доля России в эмиссии С от природных пожаров: GFED v4.1s (1997–2023 гг.)

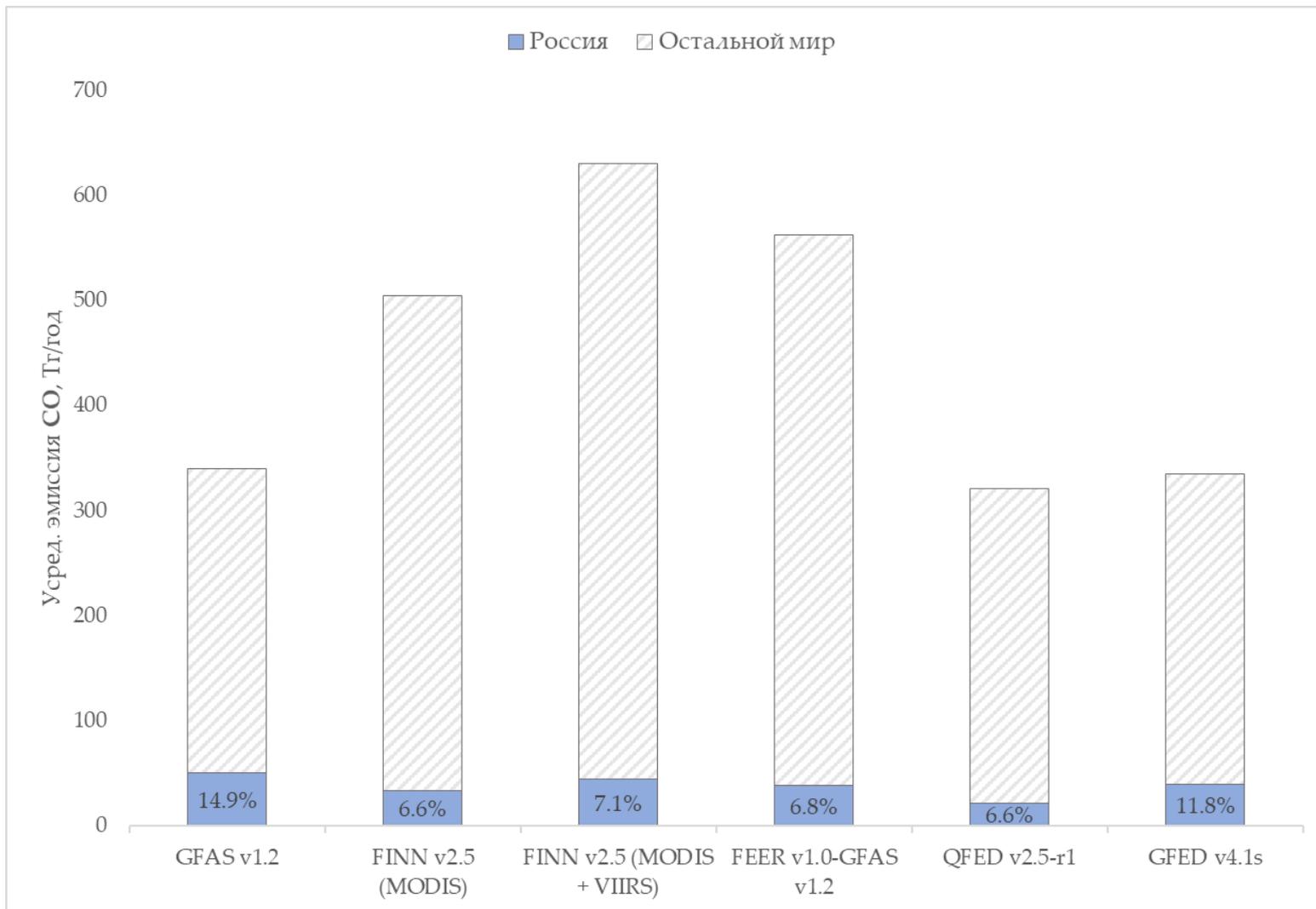


Доля России в усреднённой (за 2012–2019 гг.) эмиссии CO_2 от природных пожаров*

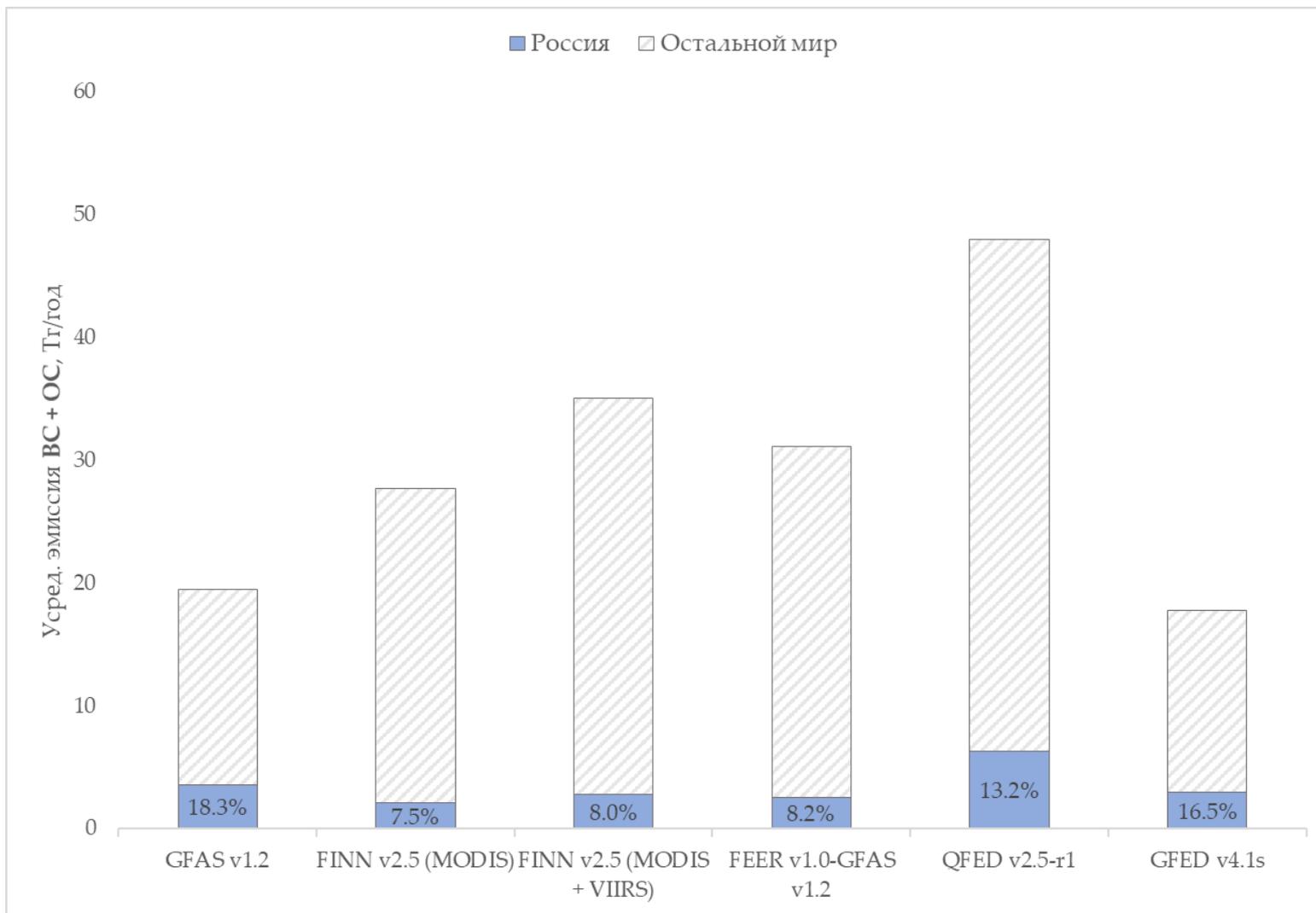


* Глобальные значения приведены по [Wiedinmyer et al., 2023]

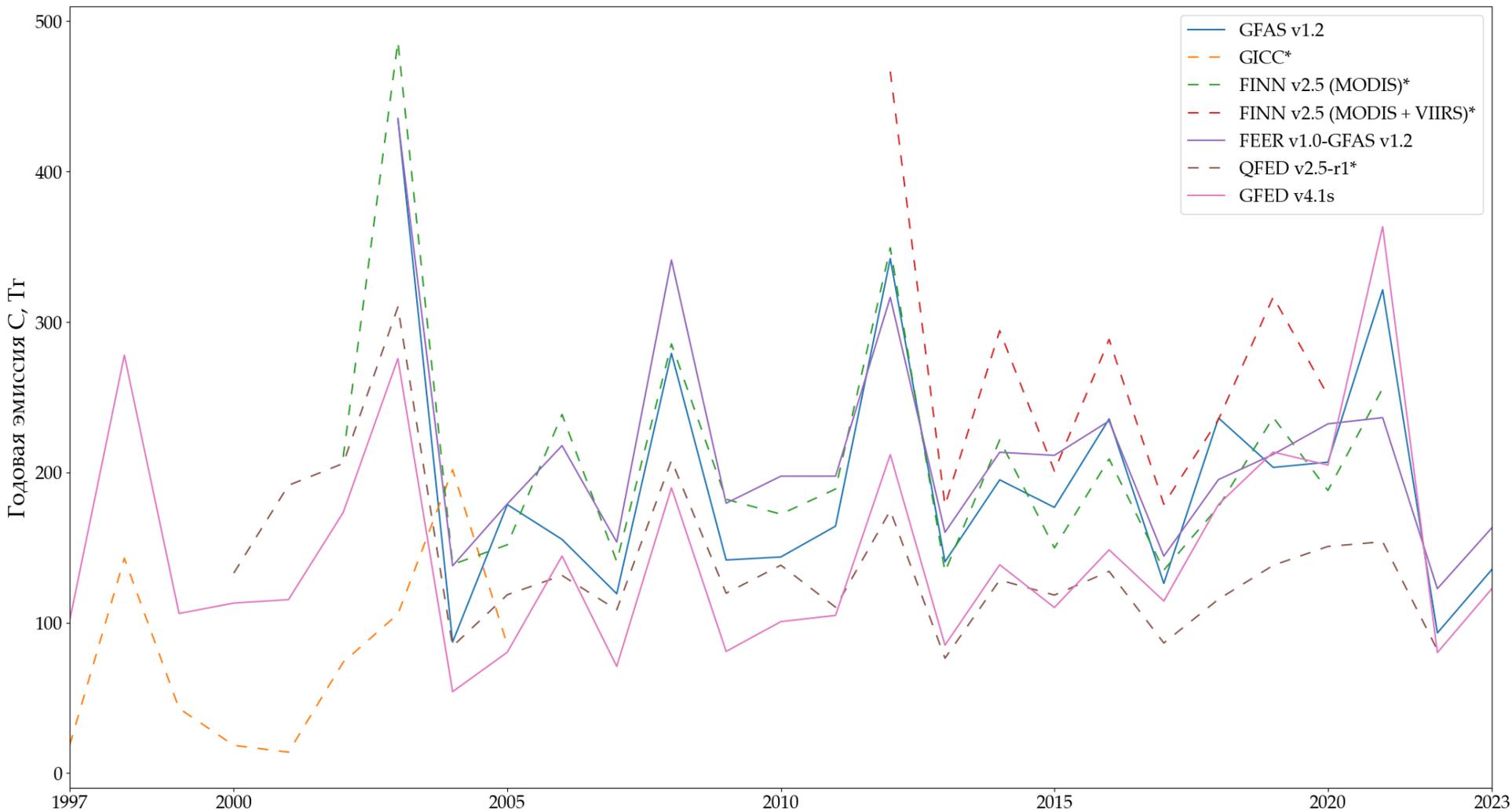
Доля России в усреднённой (за 2012–2019 гг.) эмиссии CO от природных пожаров*



Доля России в усреднённой (за 2012–2019 гг.)
 эмиссии **чёрного + органич. С** от природных пожаров*

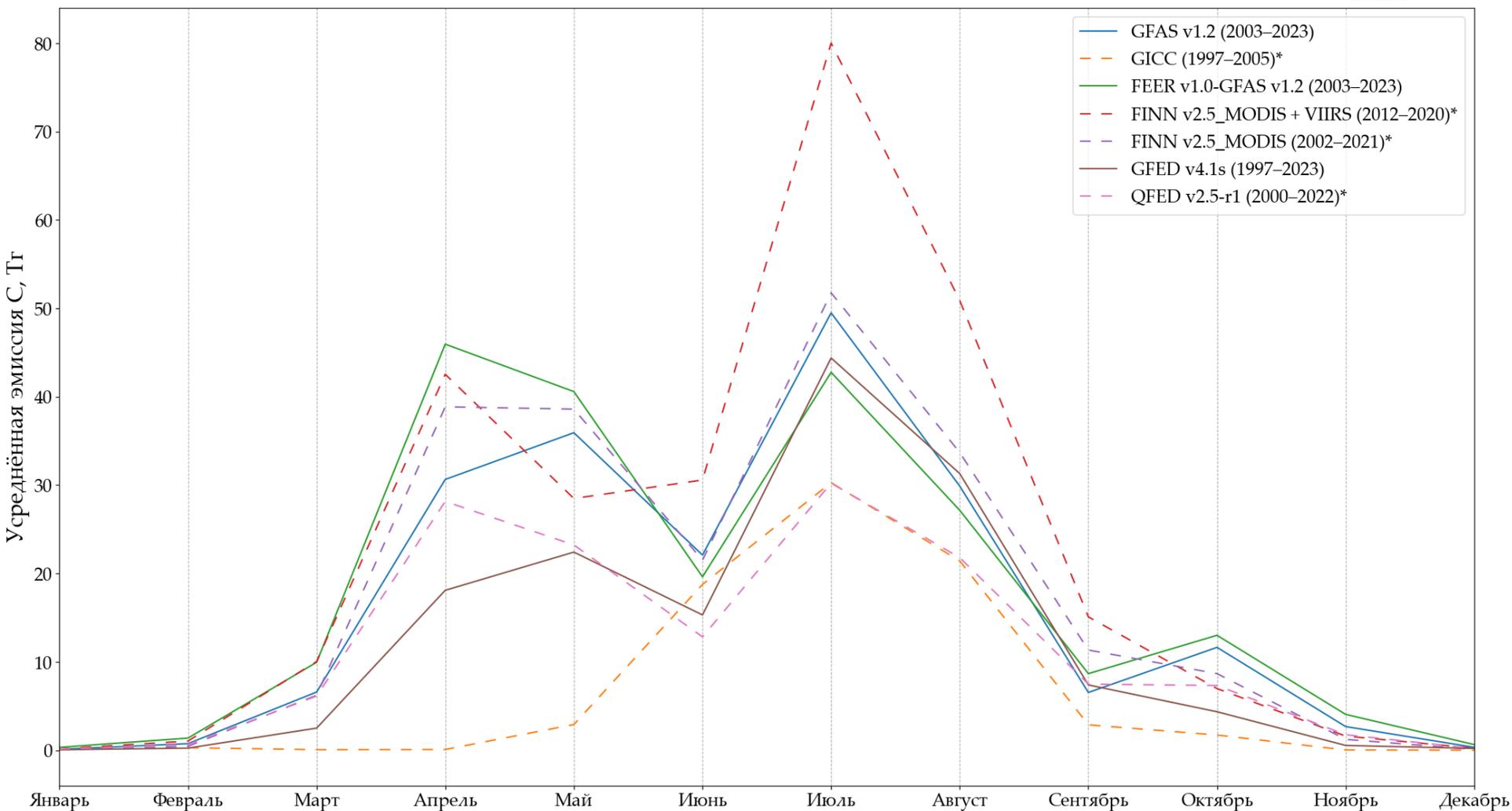


Оценка ежегодной эмиссии С от природных пожаров глобальными методиками ДЗЗ: Россия, 1997–09.2023 гг.



* Пунктиром — эмиссии С, рассчитанные по атомарной массе [CO₂, CO, CH₄, BC, OC]

Усреднённая ежемесячная эмиссия С от природных пожаров: Россия, 1997–09.2023 гг.



* Пунктиром — эмиссии С, рассчитанные по атомарной массе [CO₂, CO, CH₄, BC, OC]

Взаимная корреляция оценок продуктов: Россия, весь период наблюдений

- За исключением взаимной корреляции *FINN v2.5*, наибольшее подобие оценок наблюдается между продуктами, основанными на детекторе пожаров MOD14/MYD14 (*GFAS*, *FEER-GFAS*, *QFED*).
 - Интересно, что взаимная корреляция *FEER* и *QFED* ($R^2 = 0.93$) выше, чем *FEER* и *GFAS* ($R^2 = 0.85$), несмотря на то что последняя пара использует единую систему агрегации значений FRP. Вероятно, это связано с применением оценки эмиссии аэрозолей по MODIS AOT в случае *FEER* и *QFED*.
- Оценки *GICC* практически не коррелируют с другими методиками, включая *GFED*.
- Среди продуктов на базе FRP наибольшую корр. с основанным на детекции гарей *GFED* проявляет *GFAS* ($R^2 = 0.71$). В *GFAS* применяется регрессия FRP_{GFAS} vs поток эмиссии ($кг \cdot м^{-2} \cdot сек^{-1}$) по *GFED*.

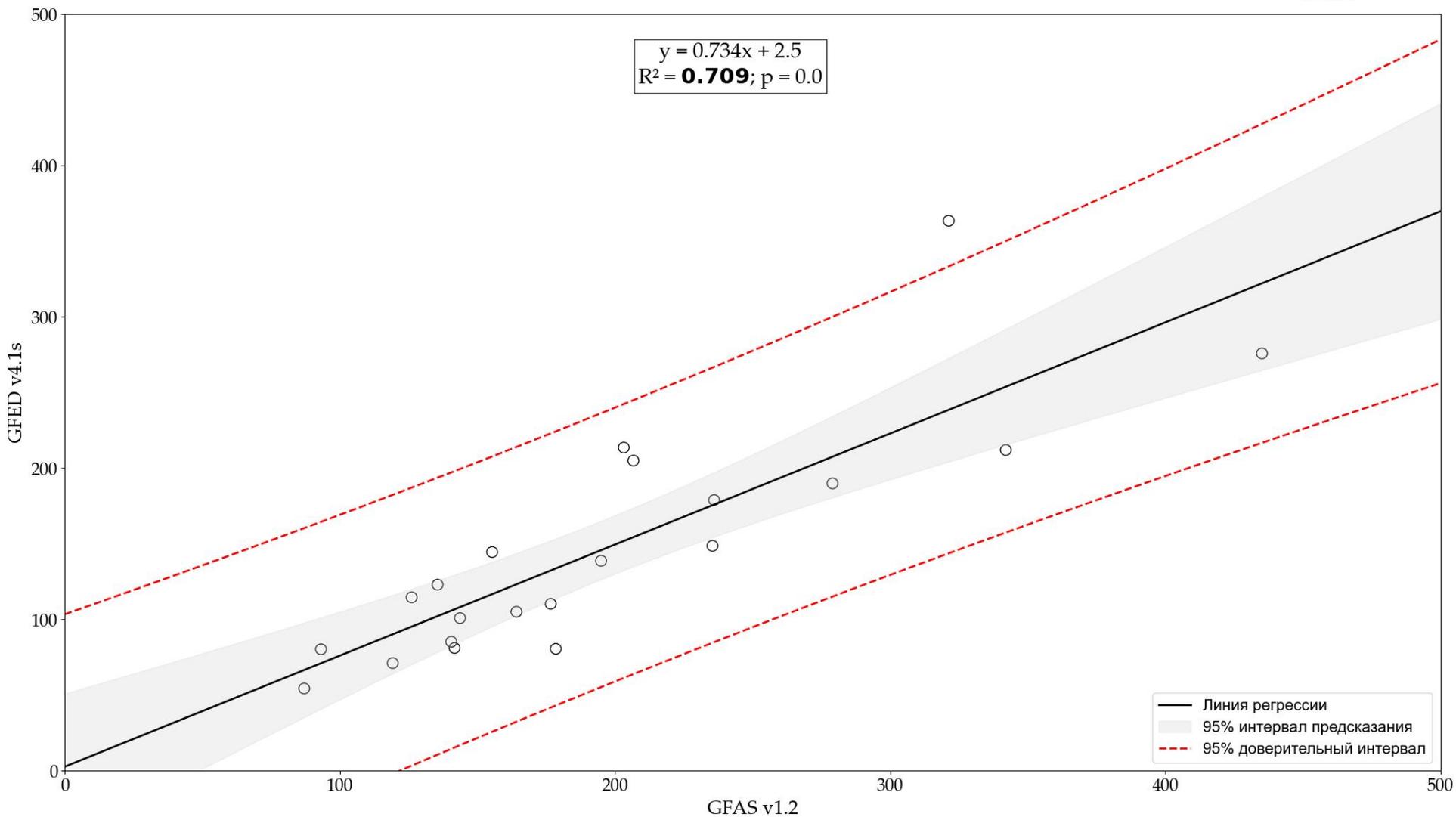
[см. карты суммарной эмиссии C за весь период наблюдений](#)

Коэф. R ²	GFAS v1.2	GICC	FINN v2.5 MODIS	FINN v2.5 MOD+VRS	FEER v1.0- GFAS v1.2	QFED v2.5-r1	GFED v4.1s
GFAS v1.2	–	0.332 2003–2005	0.815 2003–2021	0.819 2012–2020	0.84 2003–2023	0.771 2003–2022	0.709 2003–2023
GICC	0.332 2003–2005	–	0.065 2002–2005	–	0.218 2003–2005	0.055 2000–2005	0.038 1997–2005
FINN v2.5 MODIS	0.815 2003–2021	0.065 2002–2005	–	0.999 2012–2020	0.894 2003–2021	0.796 2002–2021	0.485 2002–2021
FINN v2.5 MOD+VRS	0.819 2012–2020	–	0.999 2012–2020	–	0.826 2012–2020	0.747 2012–2020	0.514 2012–2020
FEER v1.0- GFAS v1.2	0.845 2003–2023	0.218 2003–2005	0.894 2003–2023	0.826 2012–2020	–	0.932 2003–2023	0.463 2003–2023
QFED v2.5-r1	0.771 2003–2022	0.055 2000–2005	0.796 2002–2021	0.747 2012–2020	0.932 2003–2022	–	0.386 2000–2022
GFED v4.1s	0.709 2003–2023	0.038 1997–2005	0.485 2002–2021	0.514 2012–2020	0.463 2003–2023	0.386 2000–2022	–

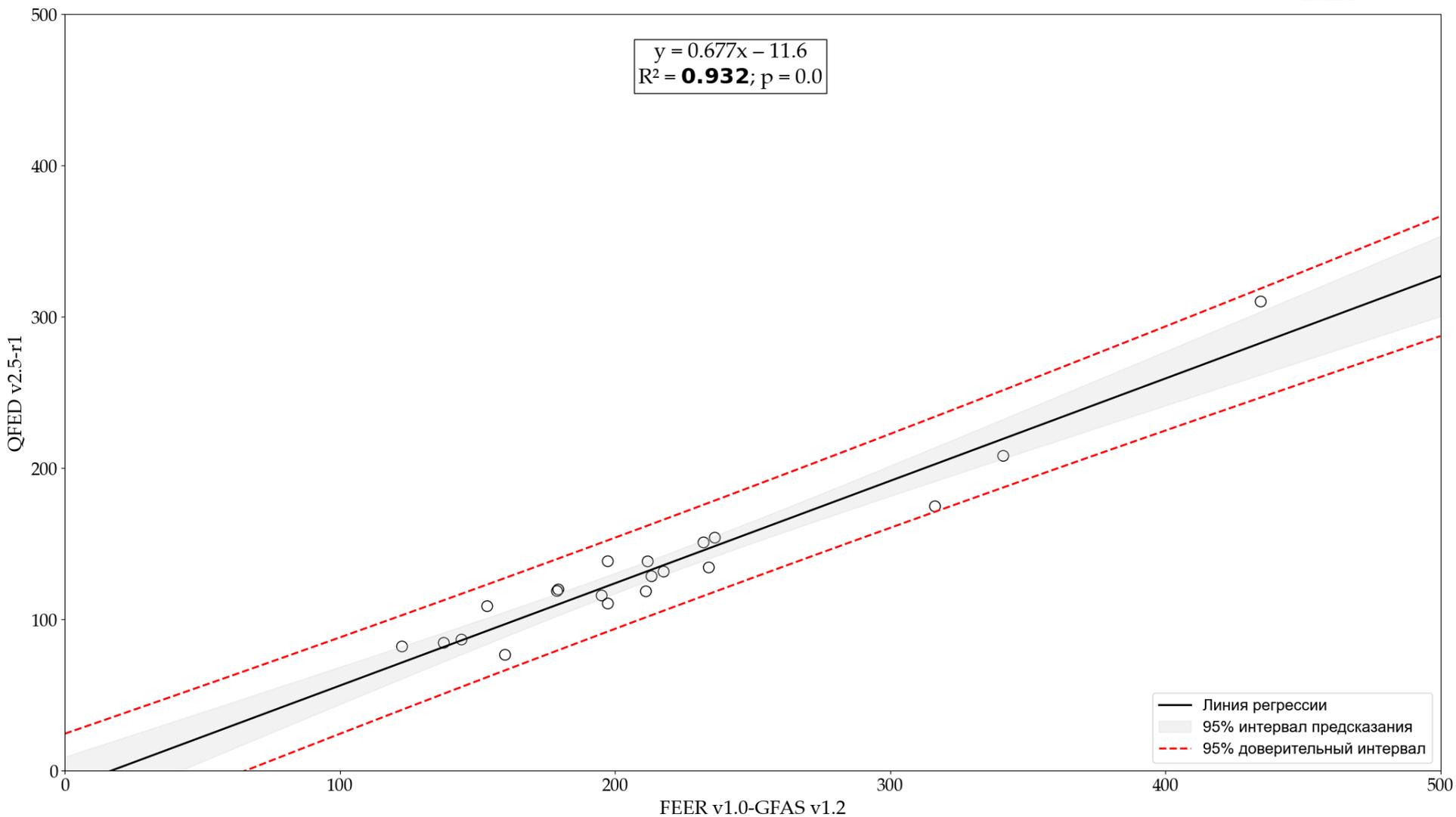
см. [апрель-май](#)

см. [июль-август](#)

Корреляция **GFAS v1.2** vs **GFED v4.1s**: весь период наблюдений (2003–2023 гг.)



Корреляция **FEER v1.0-G1.2** vs **QFED v2.5-r1**: весь период наблюдений (2003–2022 гг.)



Взаимная корреляция оценок продуктов: Россия, апрель-май

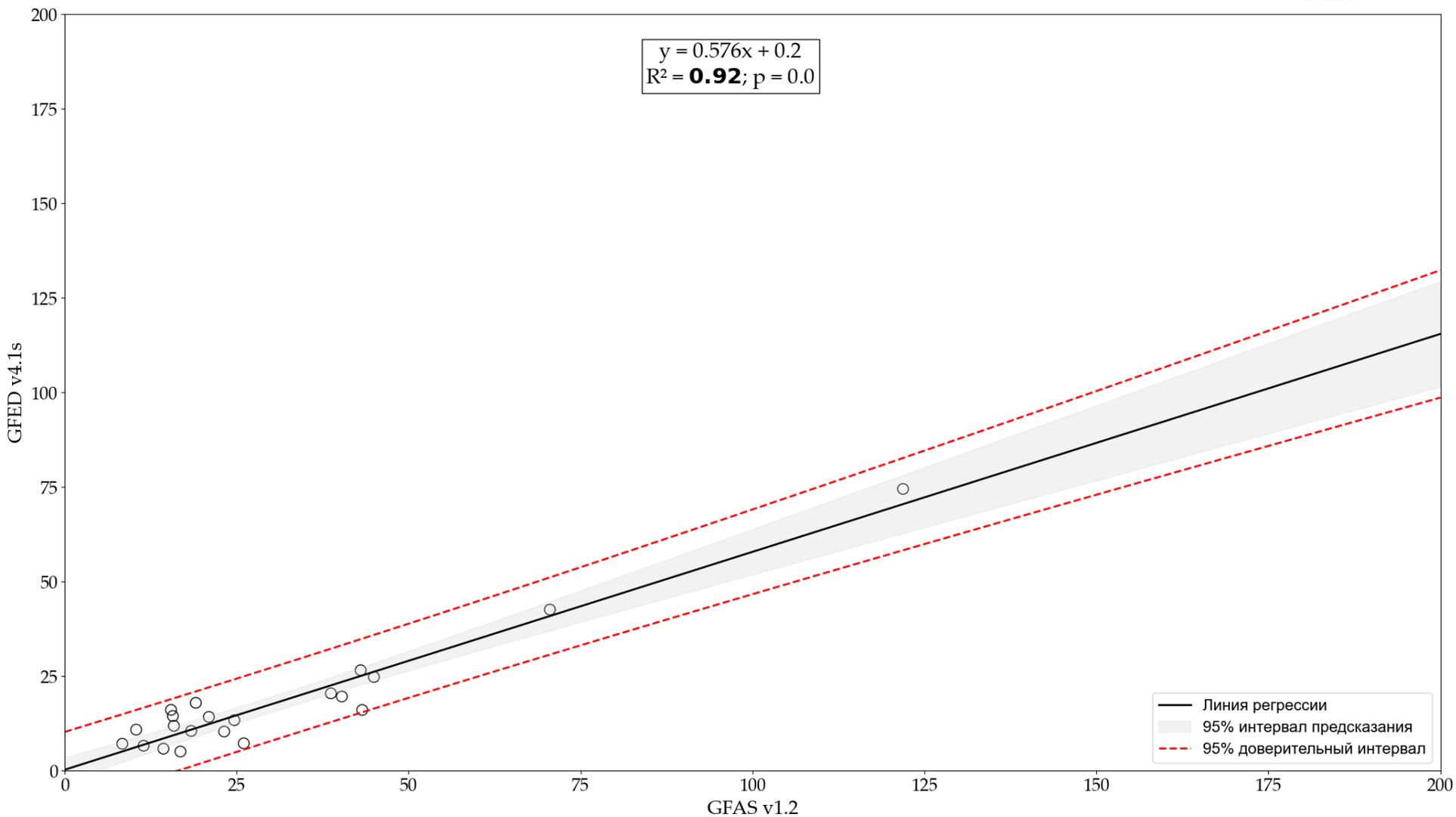
- Данные за апрель-май и июль-август выделены отдельно, поскольку они соответствуют двум пикам пожарной активности по усреднённым ежемесячным значениям ([см. график ранее](#)).
- Более высокая корреляция (по сравнению с суммарными годовыми значениями) *GFED v4.1s* с остальными методиками, в первую очередь на основе детектора пожаров MOD14/MYD14, вероятнее всего связана с применением в версии s (small fire boost) методики показателей FRP для оценки малых пожаров: основные пожары в этот период сосредоточены в с/х регионах России ([см. примеры карт суммарной эмиссии за апрель-май по QFED v2.5-r1 или GFED v4.1s](#)).
- Заметно снижается коррелируемость оценок *FINN* с применением VIIRS ($R^2 = 0.56$ vs 0.82 в случае *GFAS*). Это может указывать на значительно число пропусков MODIS малых пожаров, которые тем не менее фиксируются VIIRS active fire product.

см. [весь год](#)

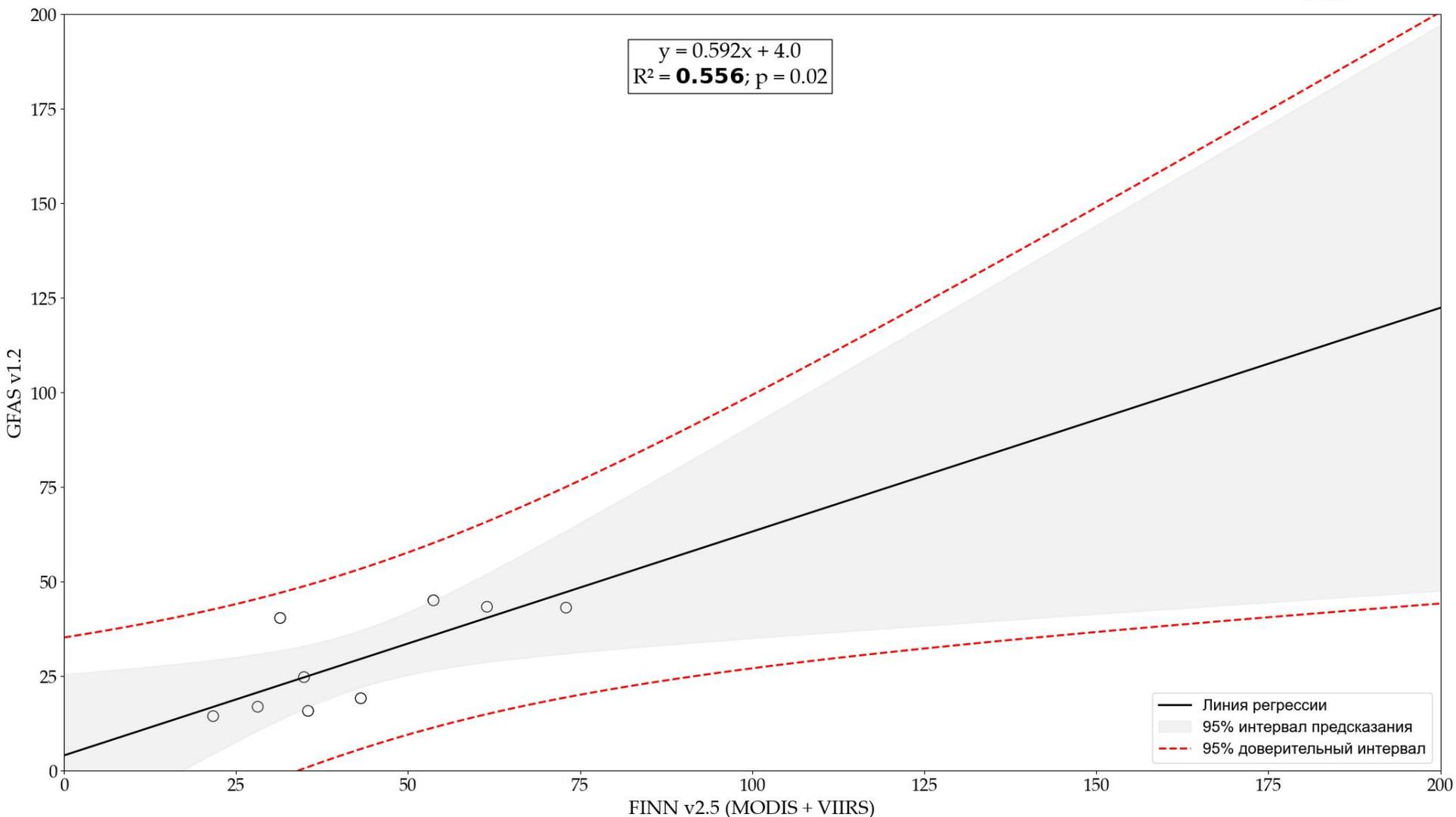
Коэф. R ²	GFAS v1.2	GICC	FINN v2.5 MODIS	FINN v2.5 MOD+VRS	FEER v1.0- GFAS v1.2	QFED v2.5-r1	GFED v4.1s
GFAS v1.2	–	–	0.776	0.556	0.958	0.932	0.92
GICC	–	–	–	–	–	0.613	0.021
FINN v2.5 MODIS	0.776	–	–	0.998	0.843	0.86	0.825
FINN v2.5 MOD+VRS	0.556	–	0.998	–	0.685	0.79	0.611
FEER v1.0- GFAS v1.2	0.958	–	0.843	0.685	–	0.974	0.909
QFED v2.5-r1	0.932	0.613	0.86	0.79	0.974	–	0.836
GFED v4.1s	0.92	0.021	0.825	0.611	0.909	0.836	–

см. [июль-август](#)

Корреляция **GFAS v1.2** vs **GFED v4.1s**: апрель-май (2003–2023 гг.)



Корреляция **FINN v.25 (MODIS + VIIRS)** vs **GFAS v1.2**: апрель-май (2012–2020 гг.)



Взаимная корреляция оценок продуктов: Россия, июль-август

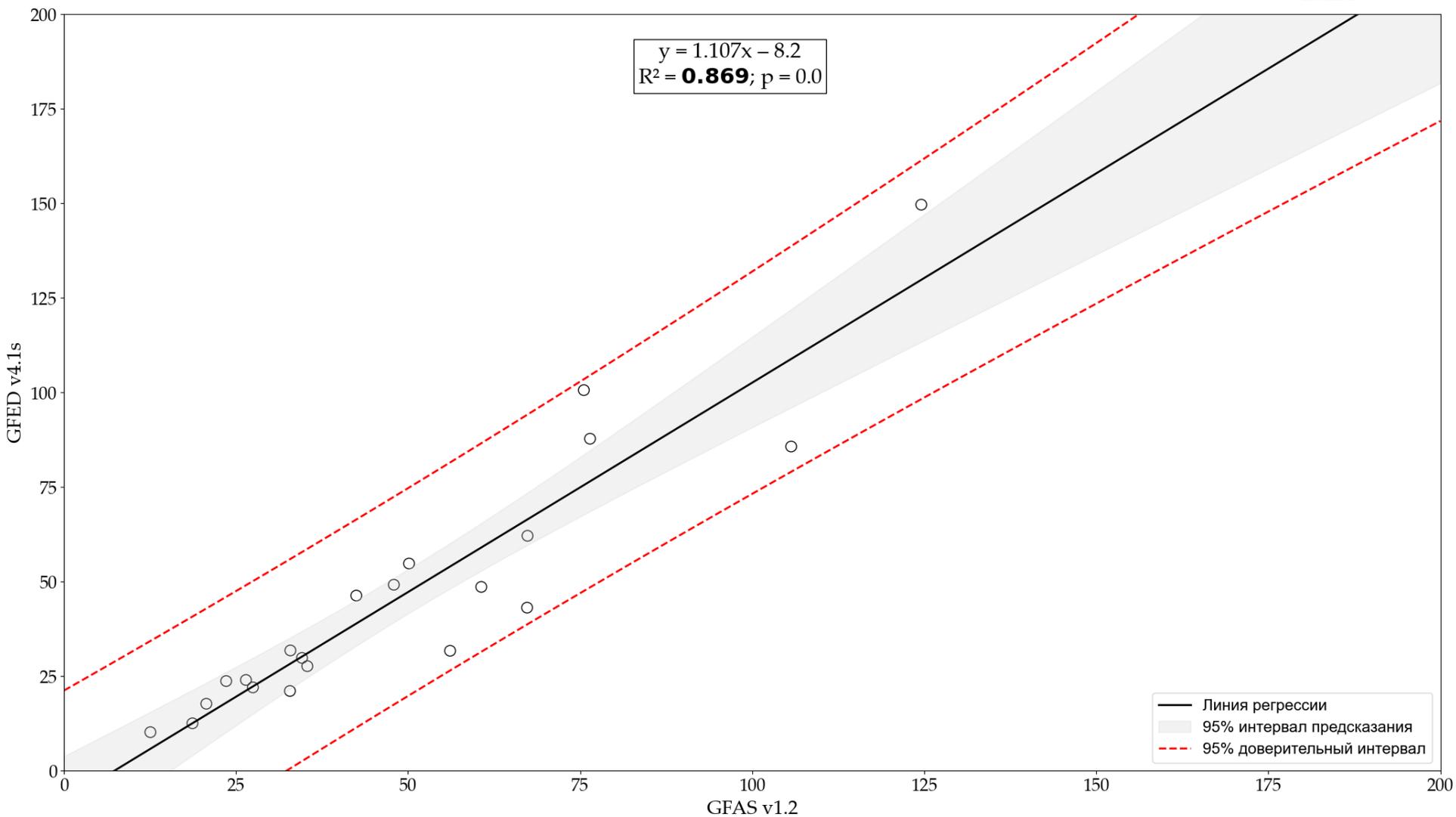
- Июль-август — сезон максимальной эмиссии от лесных пожаров в России (см. примеры карт суммарной эмиссии за апрель-май по [QFED v2.5-r1](#) или [GFED v4.1s](#)).
- Коэф. корреляции *GFED* с остальными алгоритмами в весенний и летний максимумы в среднем выше годового R^2 . Это связано с заметным изменением коэф. наклона прямой: от 0.47–0.95 в весенний период до 0.88–1.4 летом (*GFAS/FINN MODIS/FEER/QFED vs GFED*) при годовом значении 0.63–0.88; т. е. наблюдается различие в чувствительности к преобладающим типам пожаров.
- В летние месяцы заметна сниженная корреляция *QFED* с остальными методиками. Возможная причина: в случае *QFED* корреляция FRP vs поток эмиссий выполняется в глобальном масштабе (где превалируют эмиссии от пожаров в саваннах), тогда как *GFAS* (и, следовательно, *FEER*) применяют региональную калибровку [Liu et al., 2020].

см. [весь год](#)

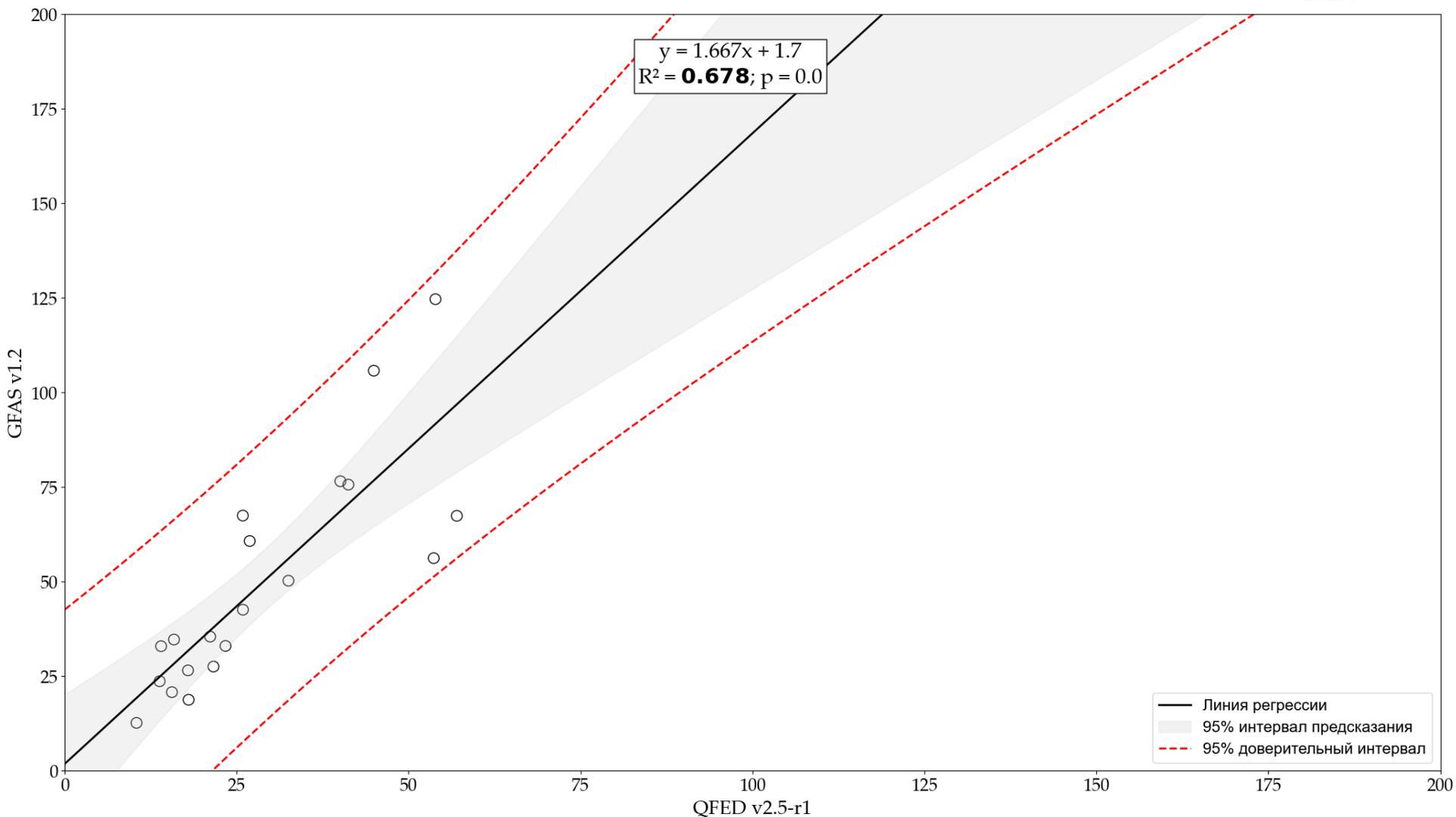
Коэф. R^2	GFAS v1.2	GICC	FINN v2.5 MOD	FINN v2.5 MOD/VRS	FEER v1.0- GFAS v1.2	QFED v2.5-r1	GFED v4.1s
GFAS v1.2	–	0.613	0.763	0.751	0.787	0.678	0.869
GICC	0.613	–	0.456	–	0.565	0.559	0.016
FINN v2.5 MOD	0.763	0.456	–	0.997	0.719	0.548	0.605
FINN v2.5 MOD/VRS	0.751	–	0.997	–	0.619	0.72	0.553
FEER v1.0- GFAS v1.2	0.787	0.565	0.719	0.619	–	0.648	0.671
QFED v2.5-r1	0.678	0.559	0.548	0.72	0.648	–	0.395
GFED v4.1s	0.869	0.016	0.605	0.553	0.671	0.395	–

см. [апрель-май](#)

Корреляция **GFAS v1.2** vs **GFED v4.1s**: июль-август (2003–2023 гг.)



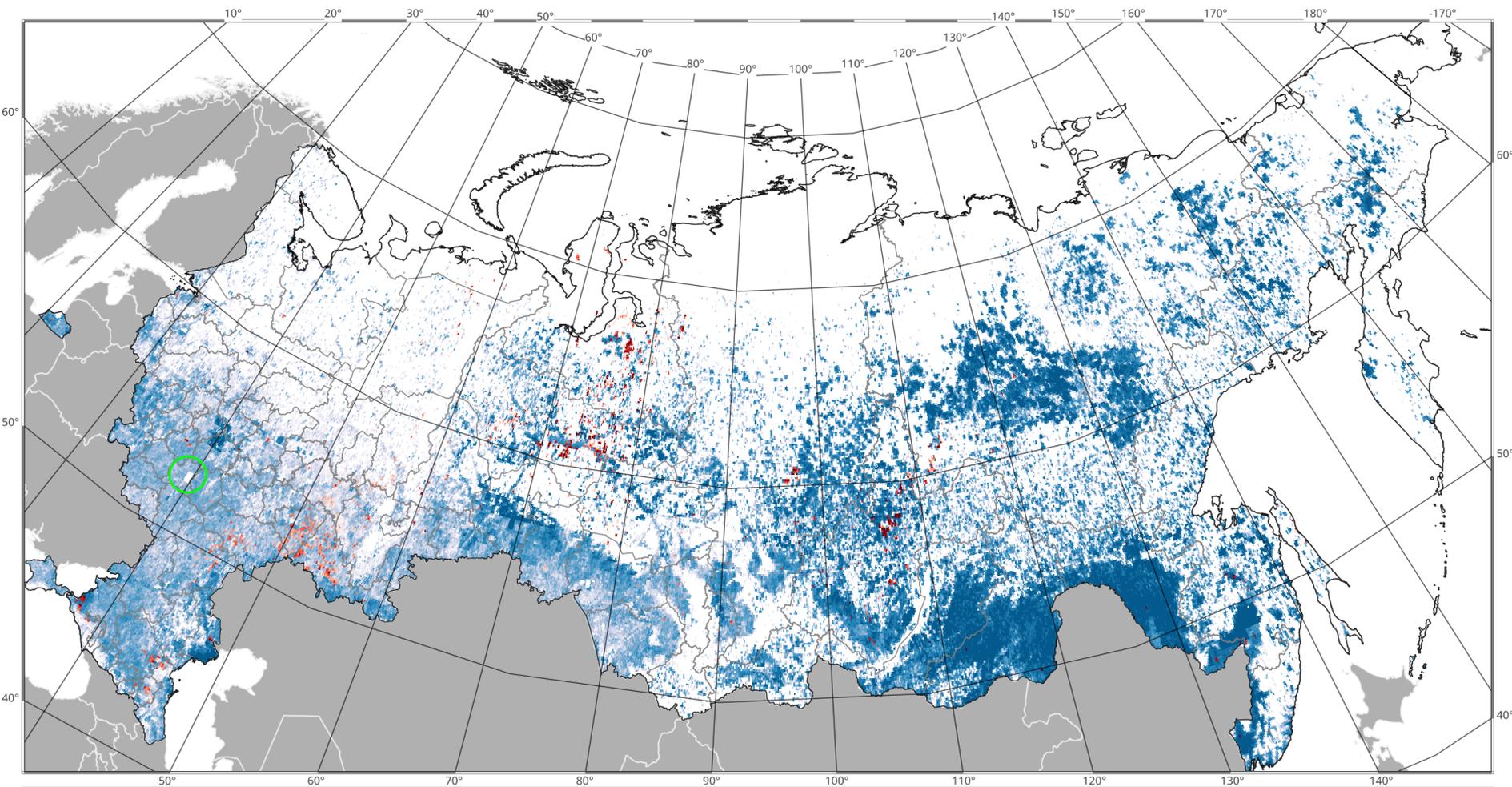
Корреляция QFED v2.5-r1 vs GFAS v1.2: июль-август (2003–2022 гг.)



Карты суммарной эмиссии **C** за 2003–2021 гг.
(2012–2023 гг. для *FINN v2.5 MODIS + VIIRS*)

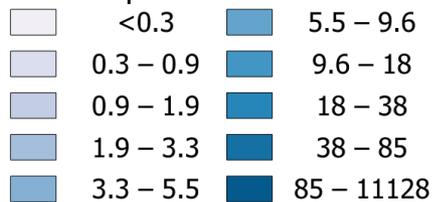
с выделением пикселей, содержащих
стабильную термоаномалию по **VIIRS Nightfire**

GFAS v1.2: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

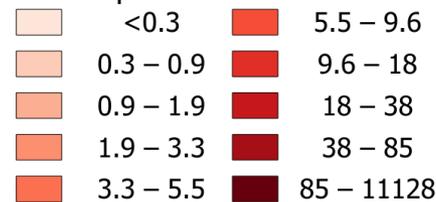


Эмиссия C, Tг:

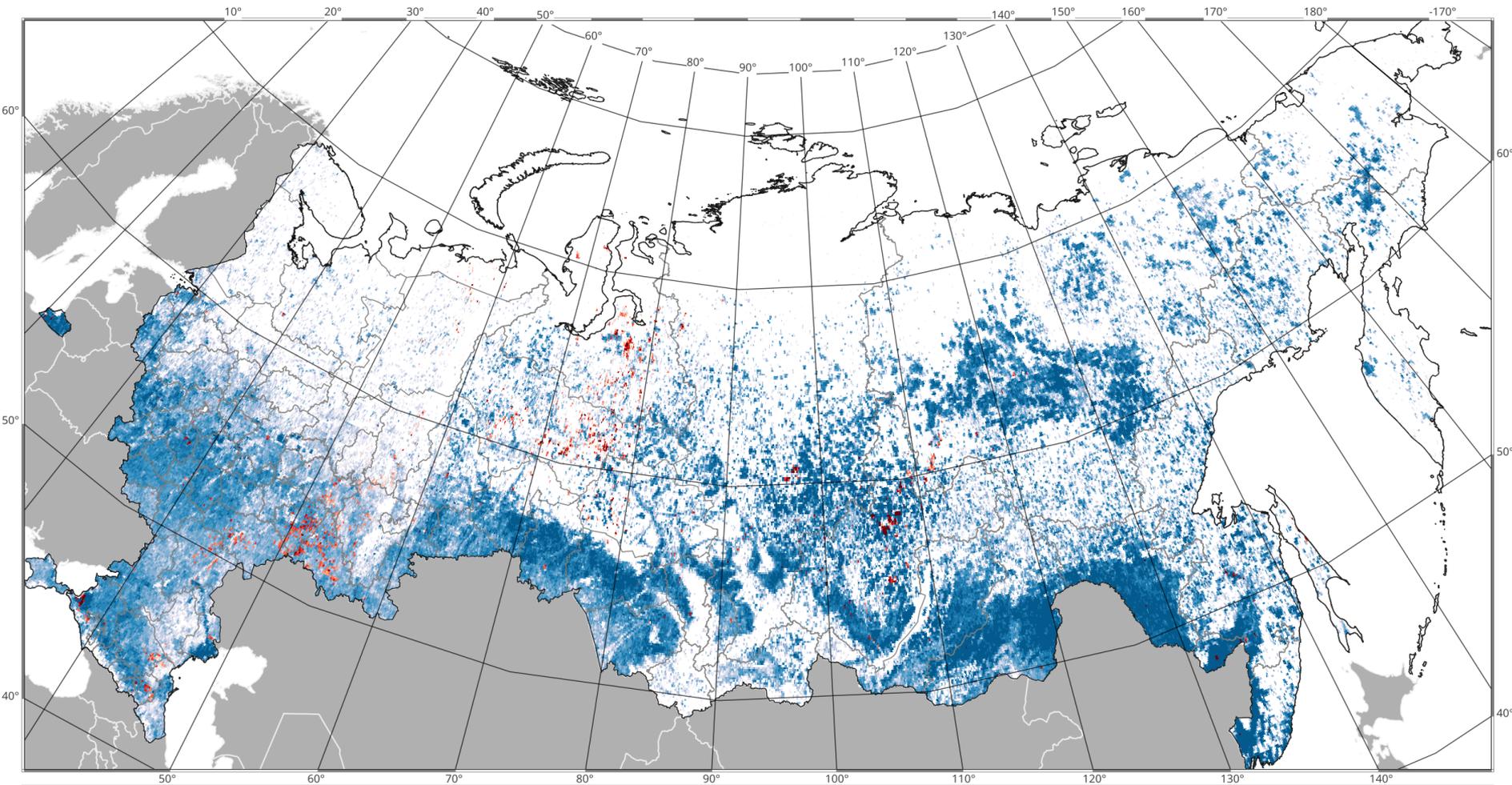
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

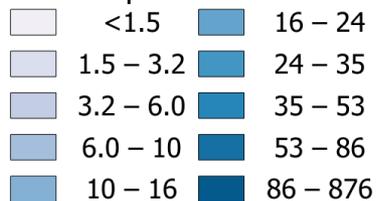


FINN v2.5 (MODIS): суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

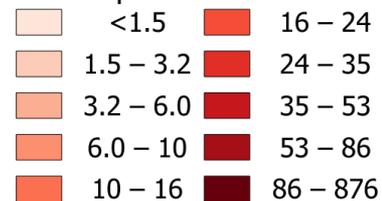


Эмиссия C, Tг:

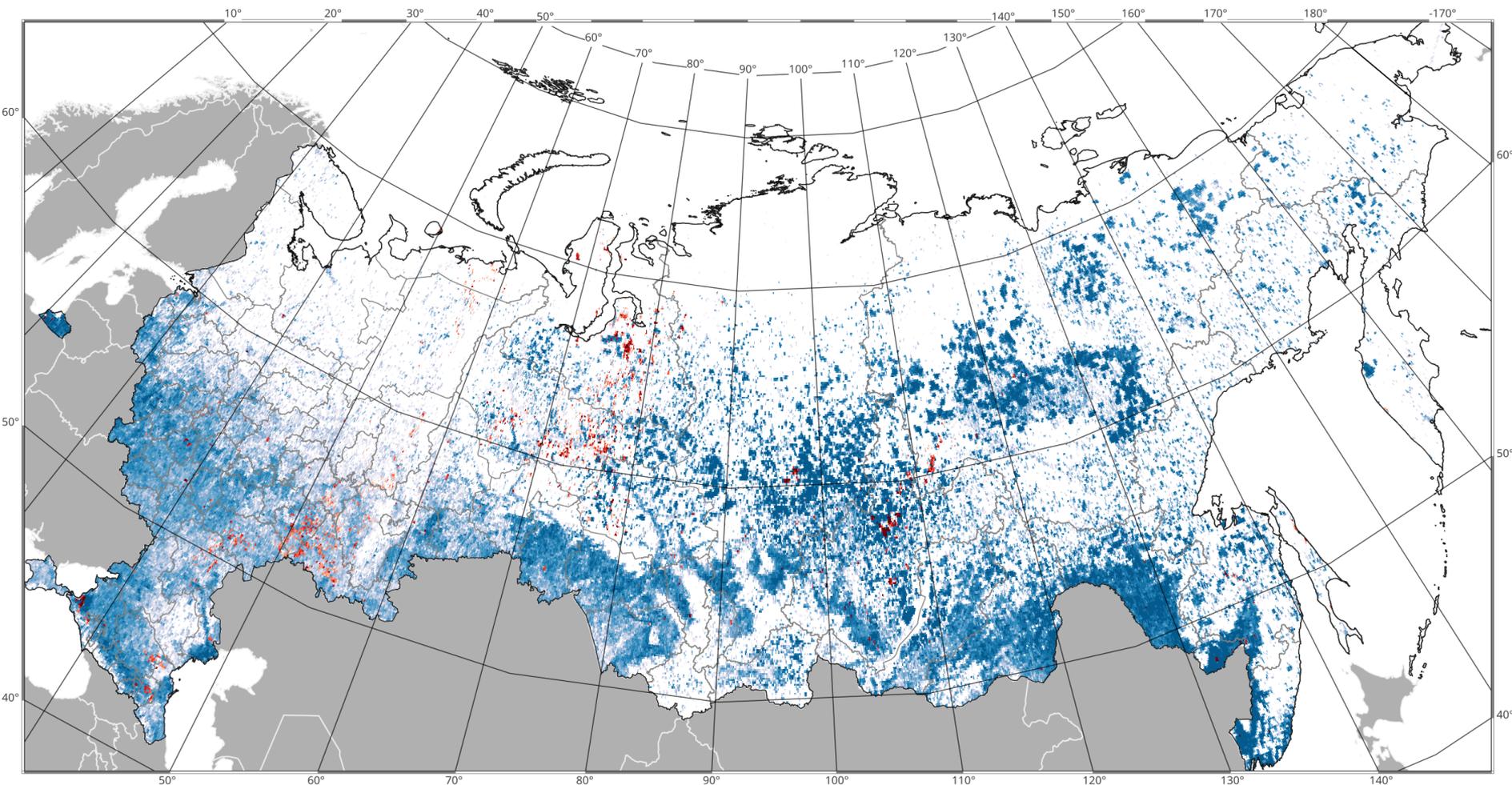
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

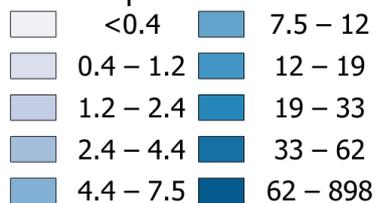


FINN v2.5 (MODIS + VIIRS): суммарная эмиссия углерода (C) за 2012–2020 гг.

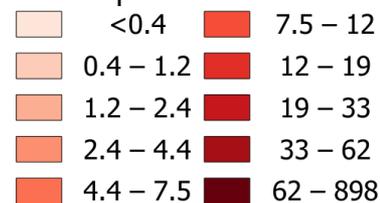


Эмиссия C, Tg:

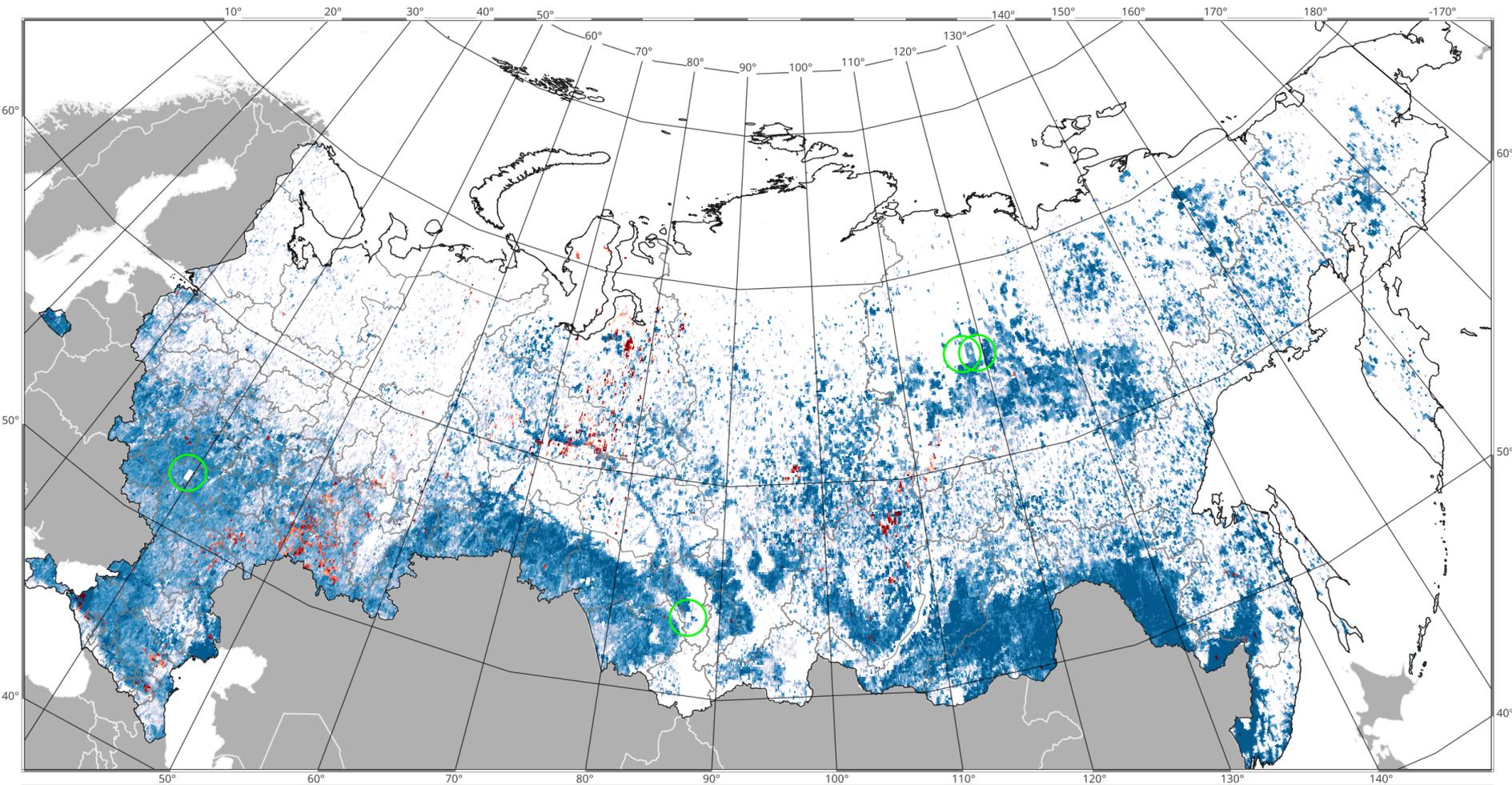
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

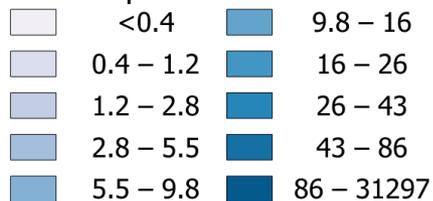


FEERv1.0-GFASv1.2: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

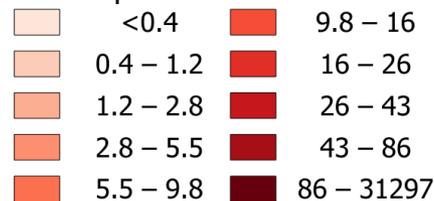


Эмиссия C, Tг:

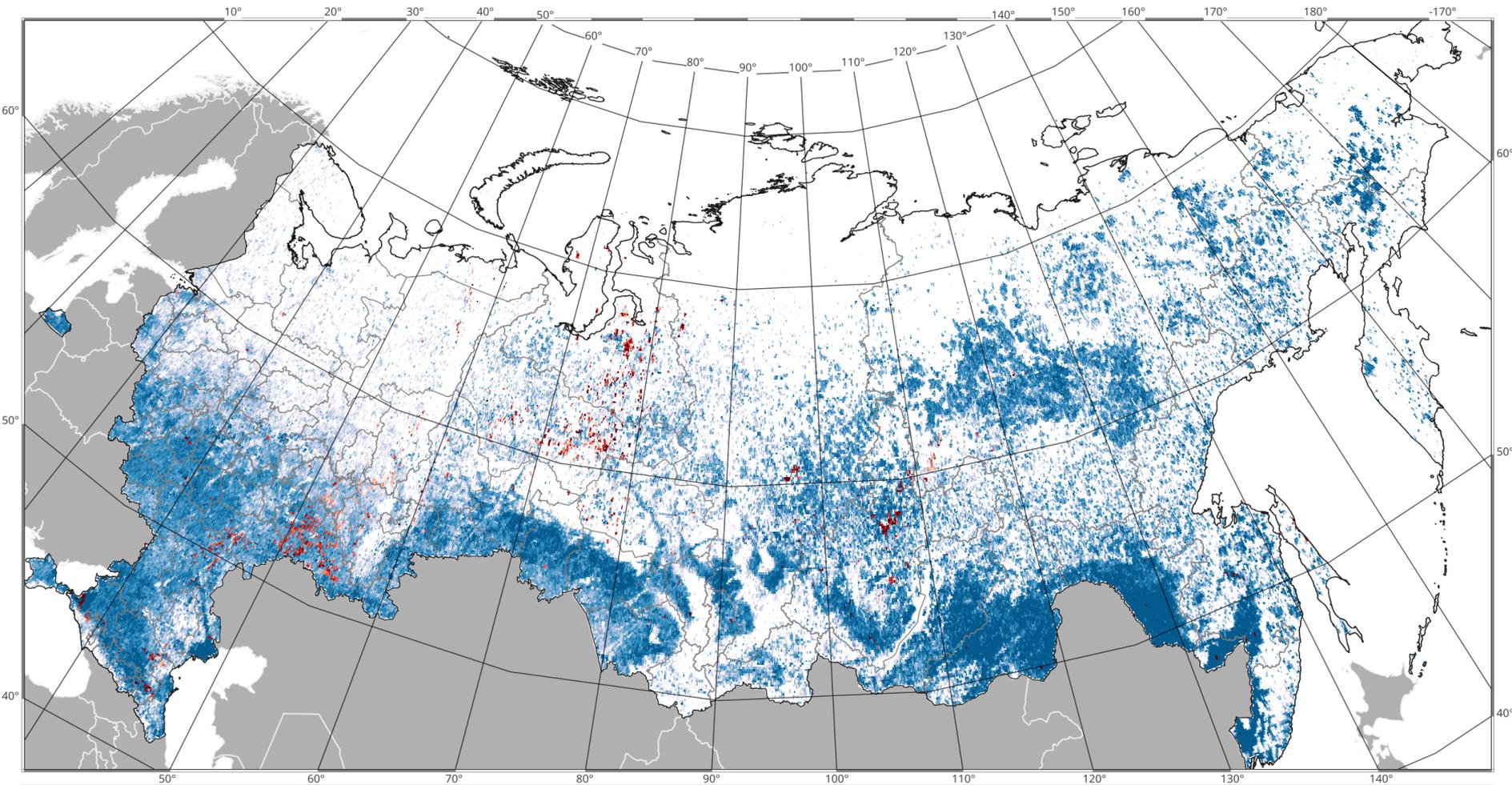
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

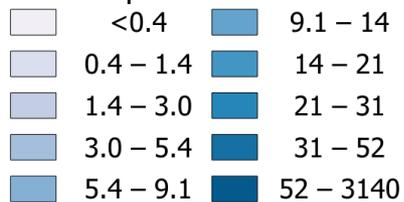


QFEDr2.5-v1: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

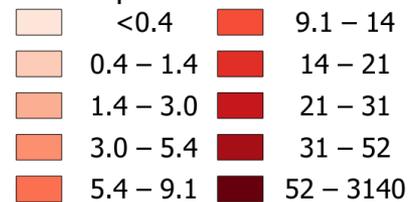


Эмиссия C, Tg:

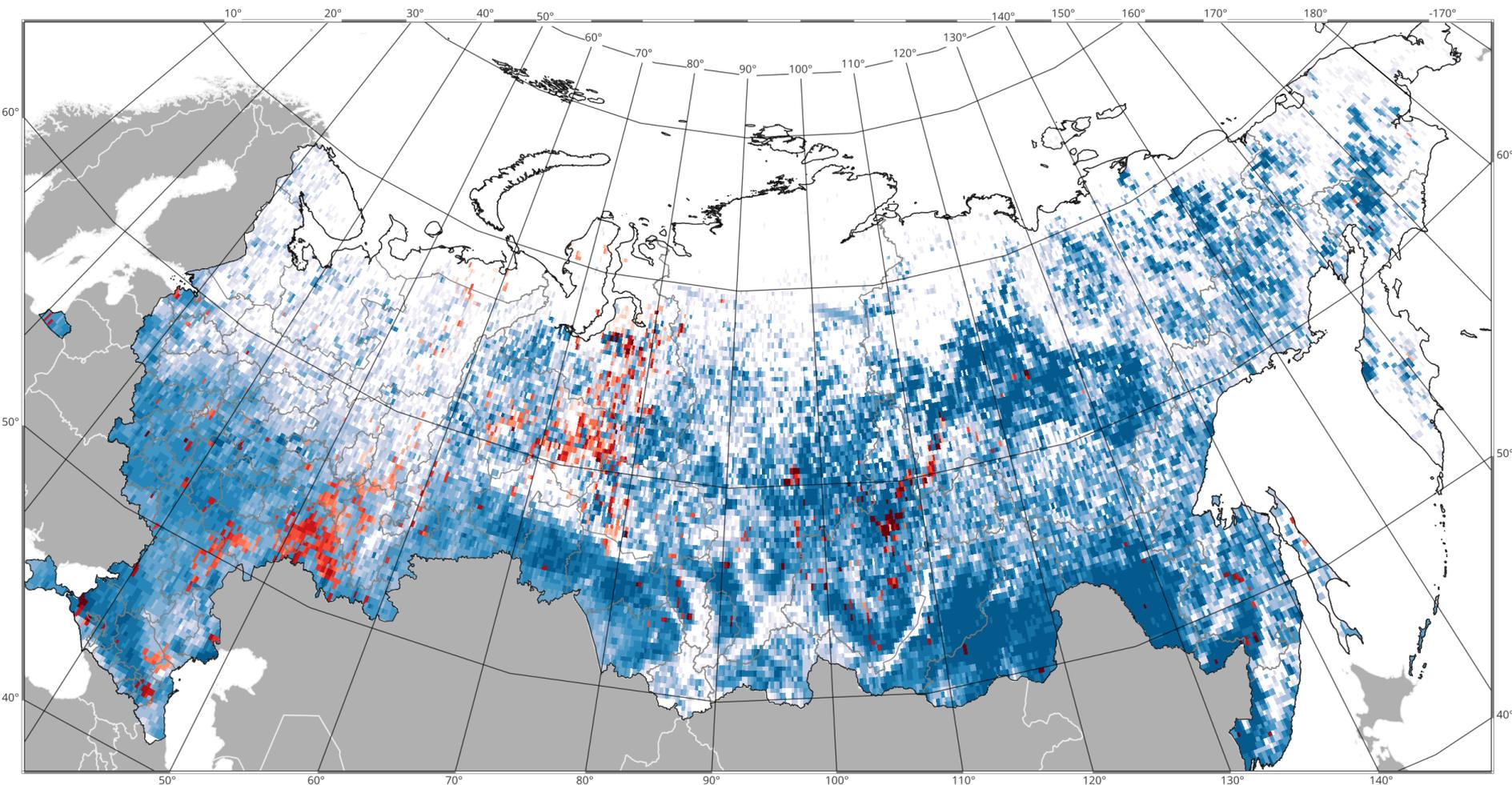
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

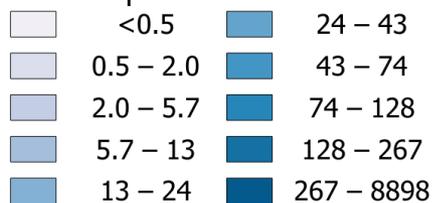


GFED v4.1s: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

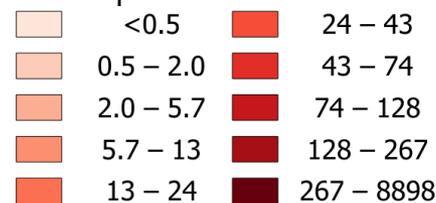


Эмиссия C, Tg:

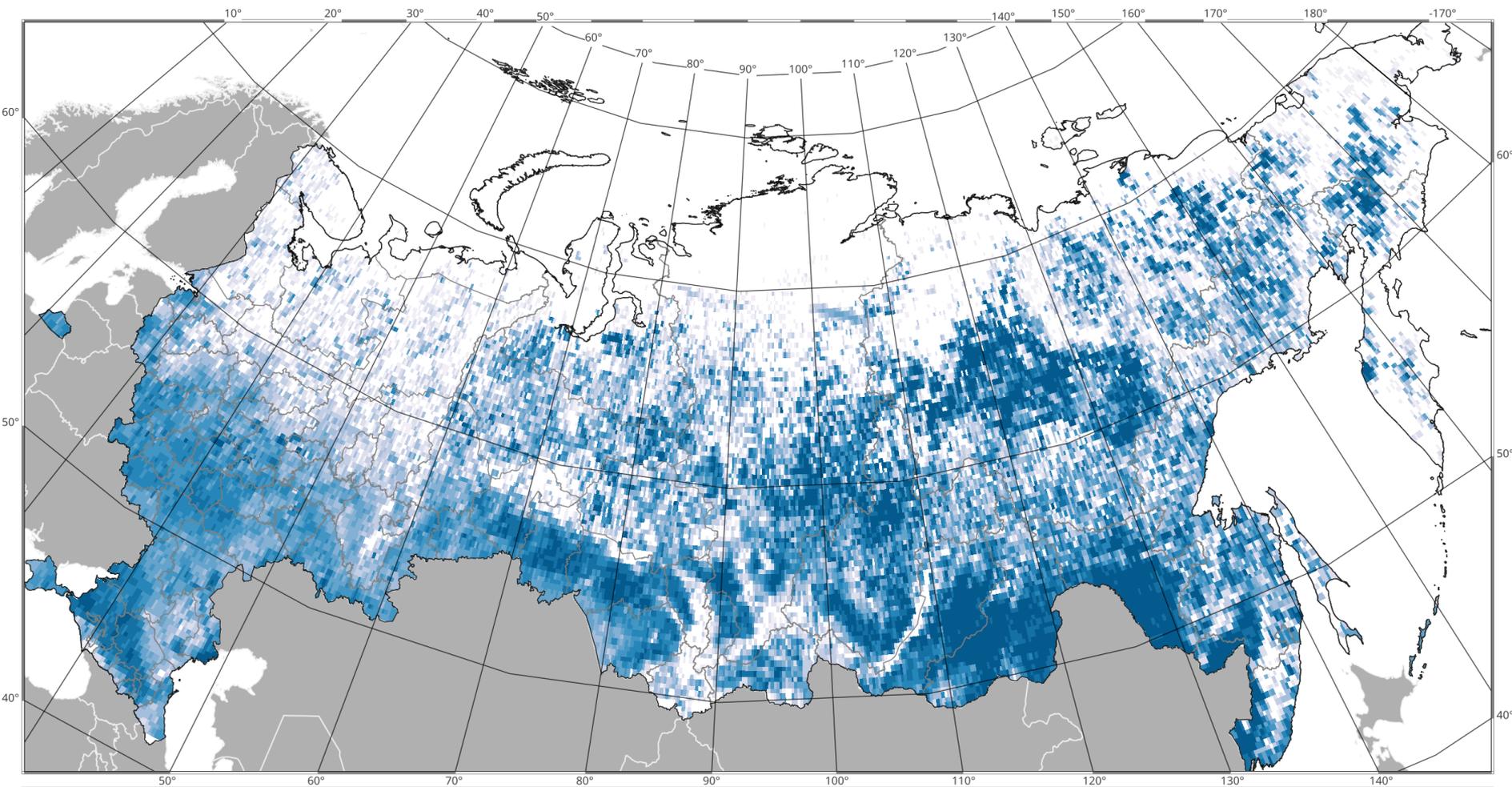
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



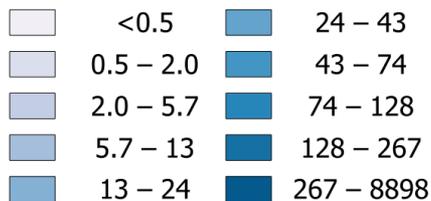
Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:



GFED v4.1s: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг. (без VIIRS Nightfire)

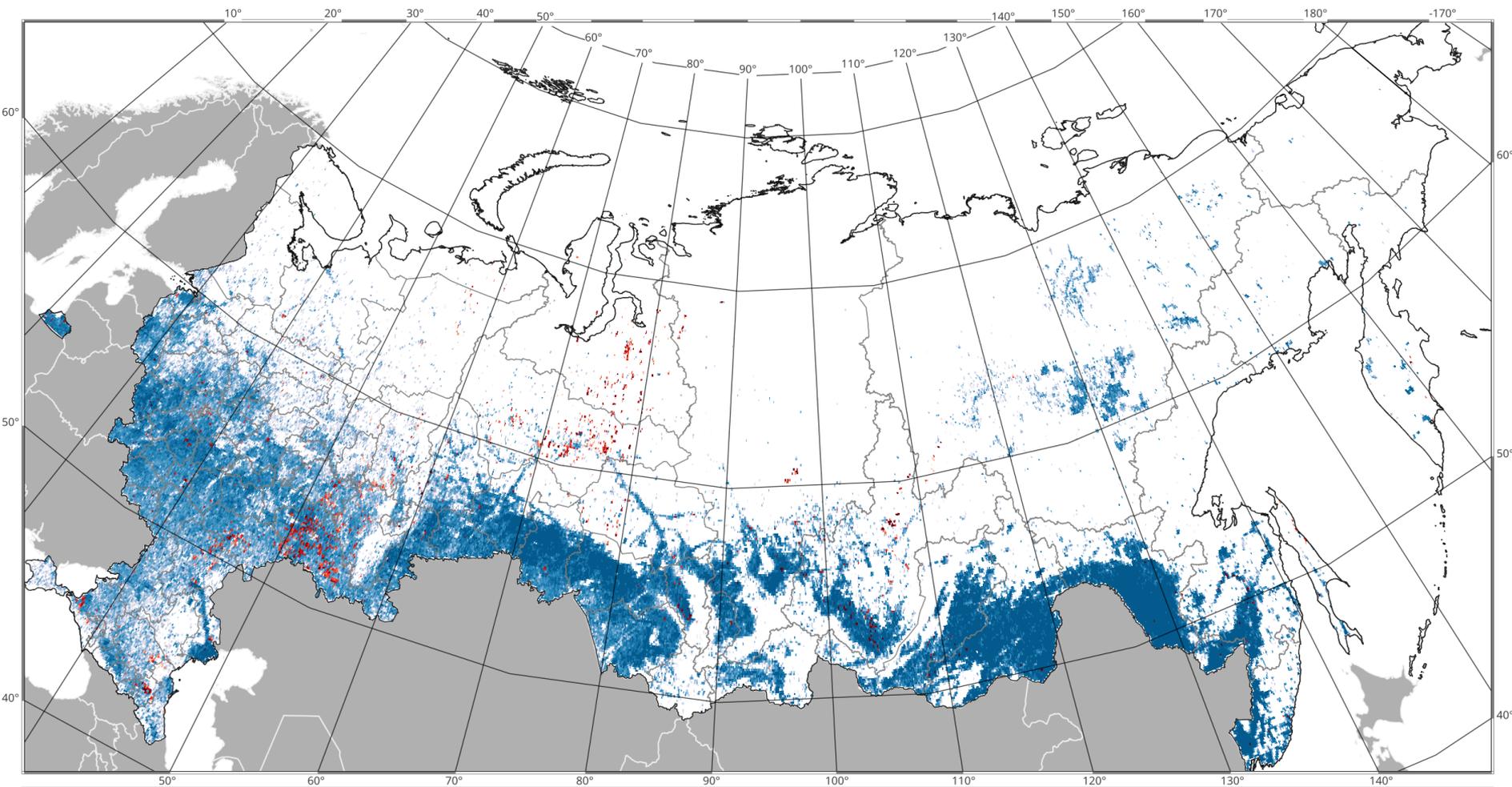


Эмиссия C, Tг:



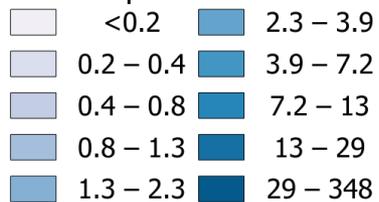
Карты эмиссии S за весь период наблюдений
за пиковые *месяцы* природных пожаров
(апрель-май, июль-август, октябрь):
на примере **QFED v2.5-r1**
(оценка на основе *термоаномалий (FRP)*)

QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за апрель-май, 2000–2022 гг.

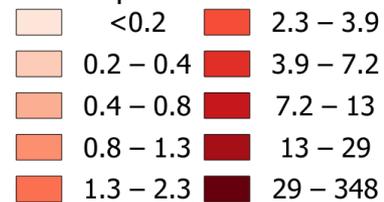


Эмиссия C, Tg:

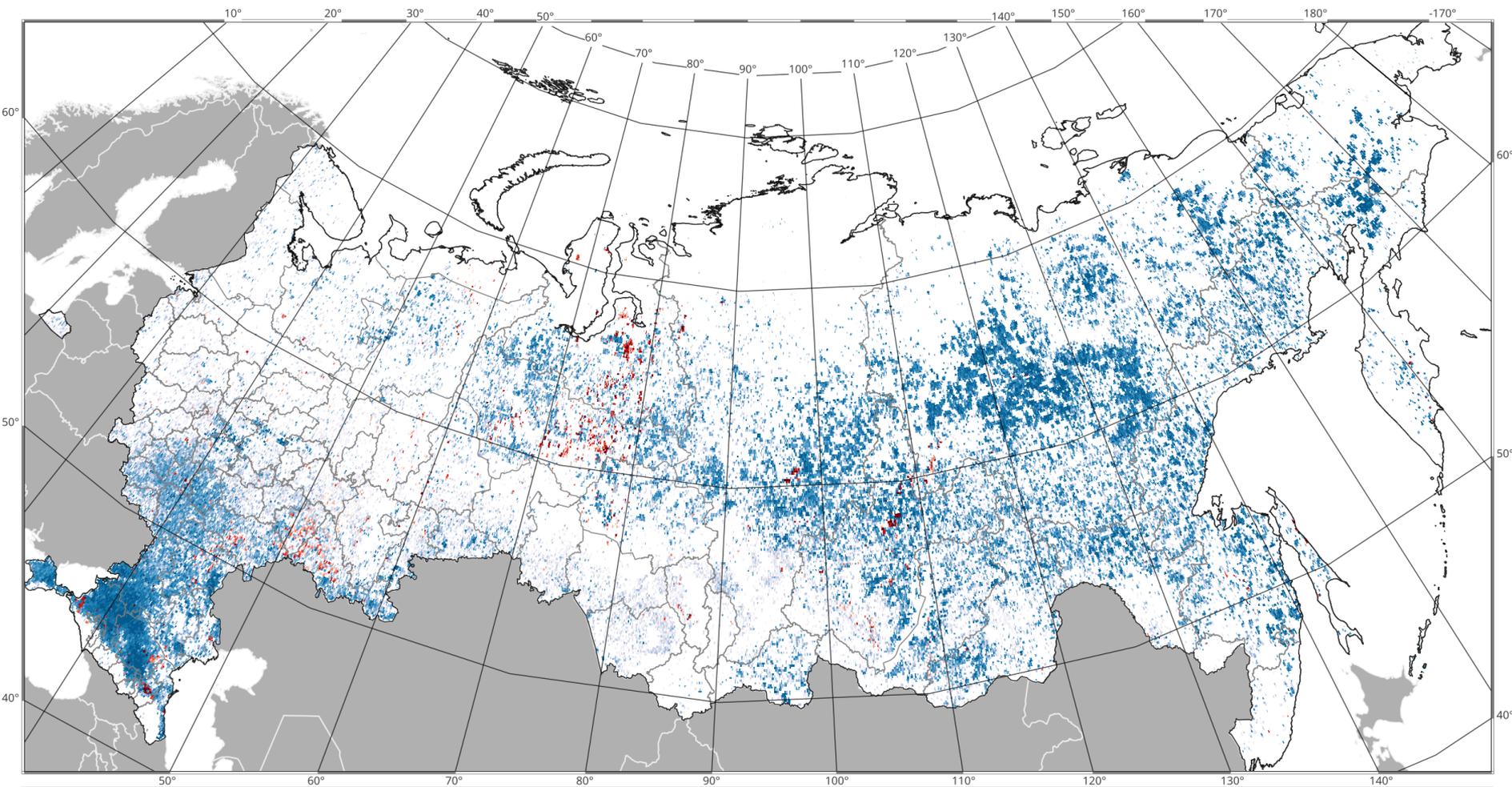
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

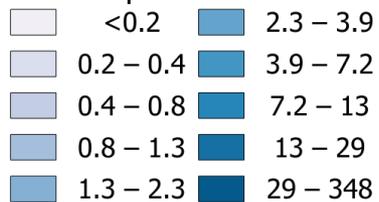


QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за июль-август, 2000–2022 гг.

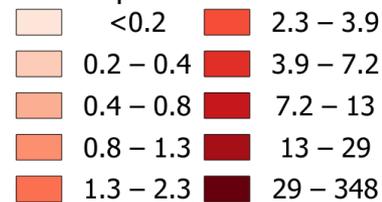


Эмиссия C, Tg:

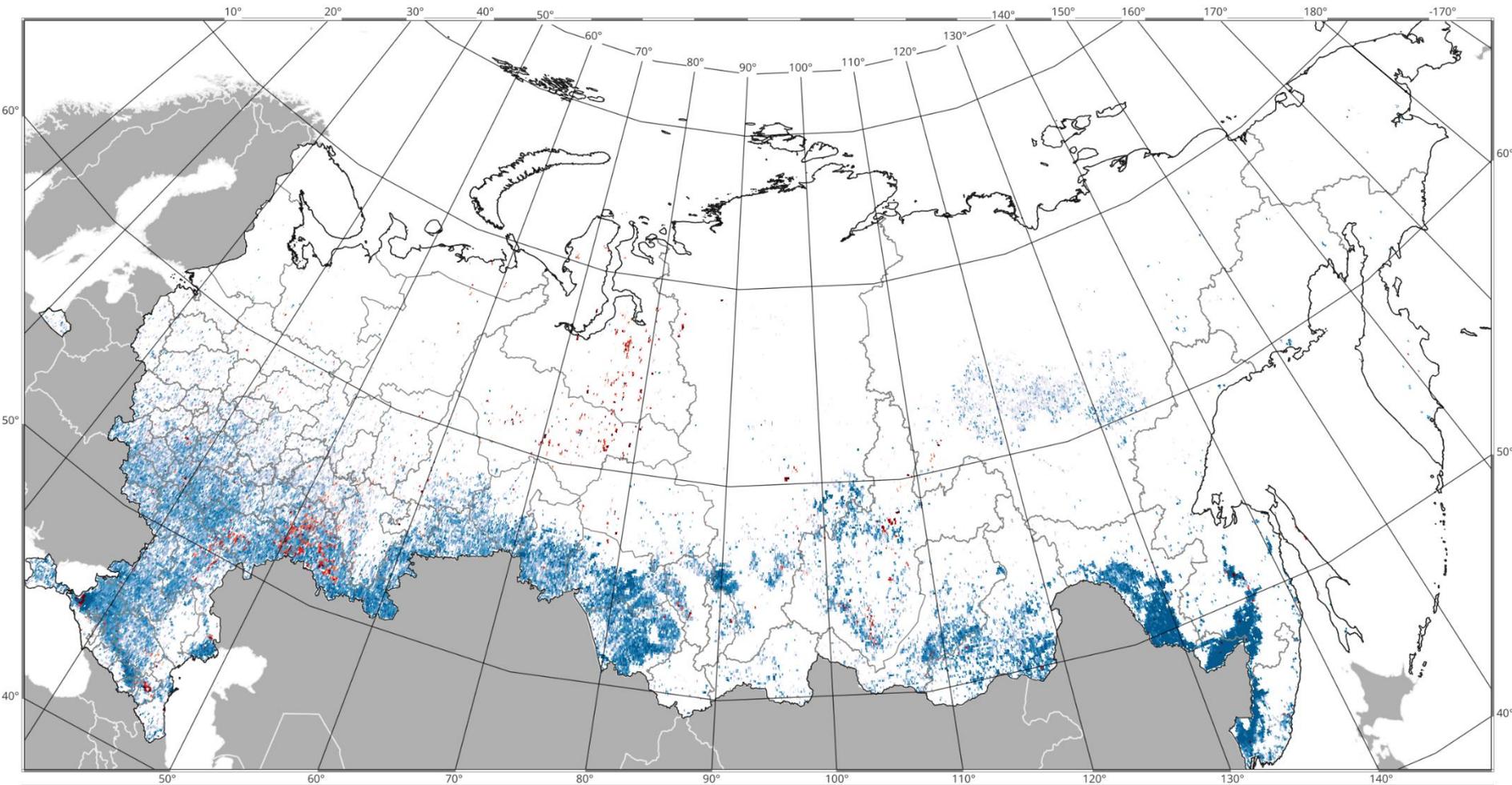
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

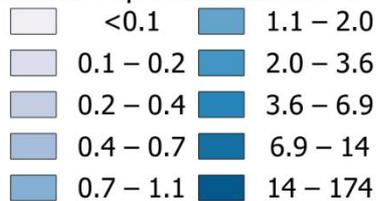


QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за октябрь, 2000–2022 гг.

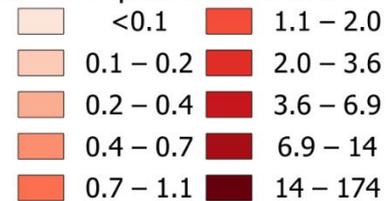


Эмиссия C, Tg:

Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:

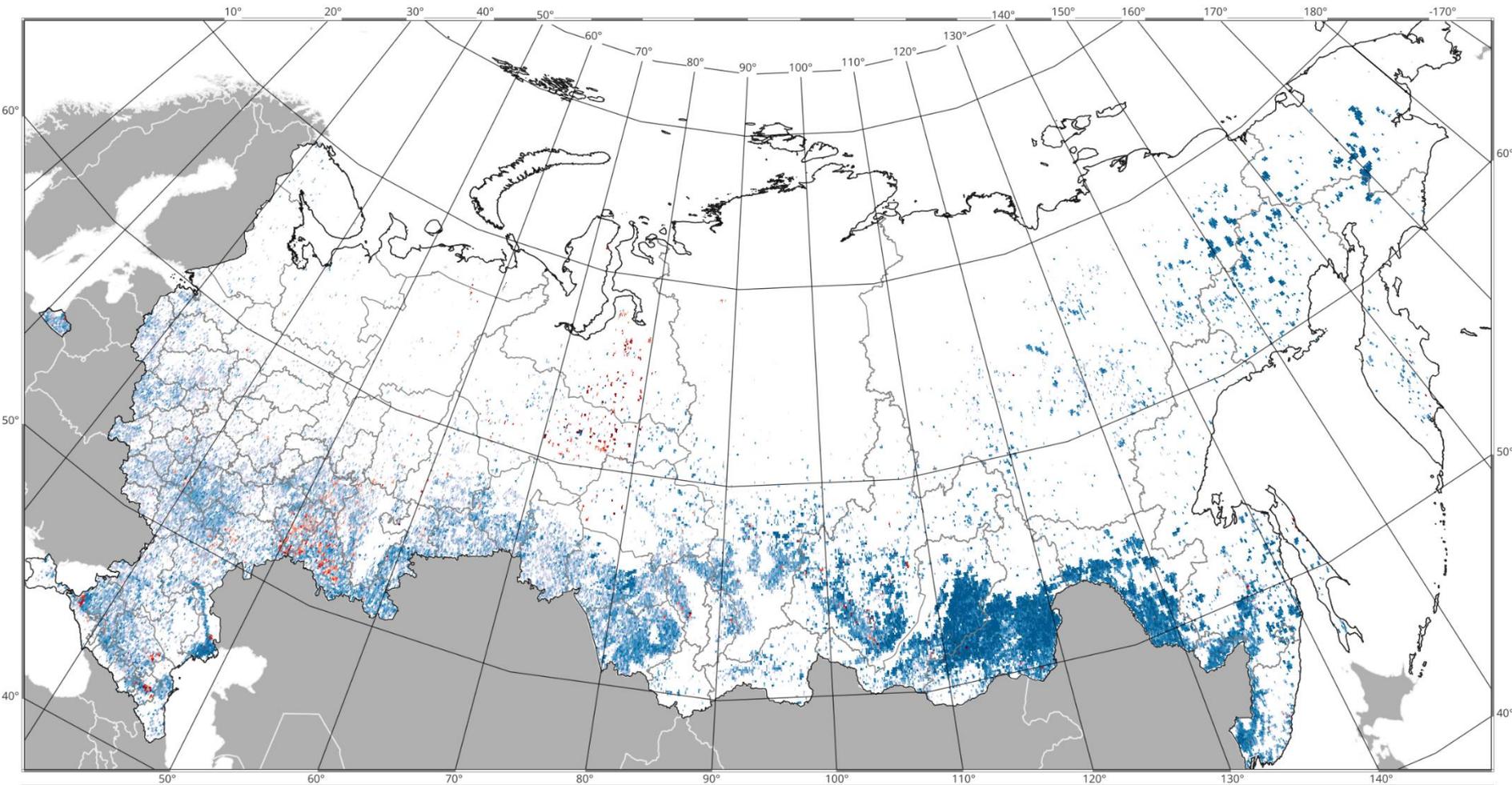


Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:



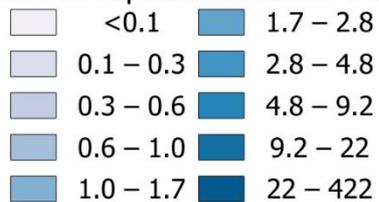
Карты эмиссии С
в *годы* пиковых эмиссий (2003, 2005, 2012, 2021)
на примере **QFED v2.5-r1**

QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003 г.

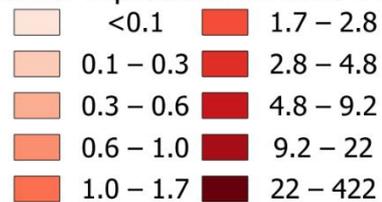


Эмиссия C, Tg:

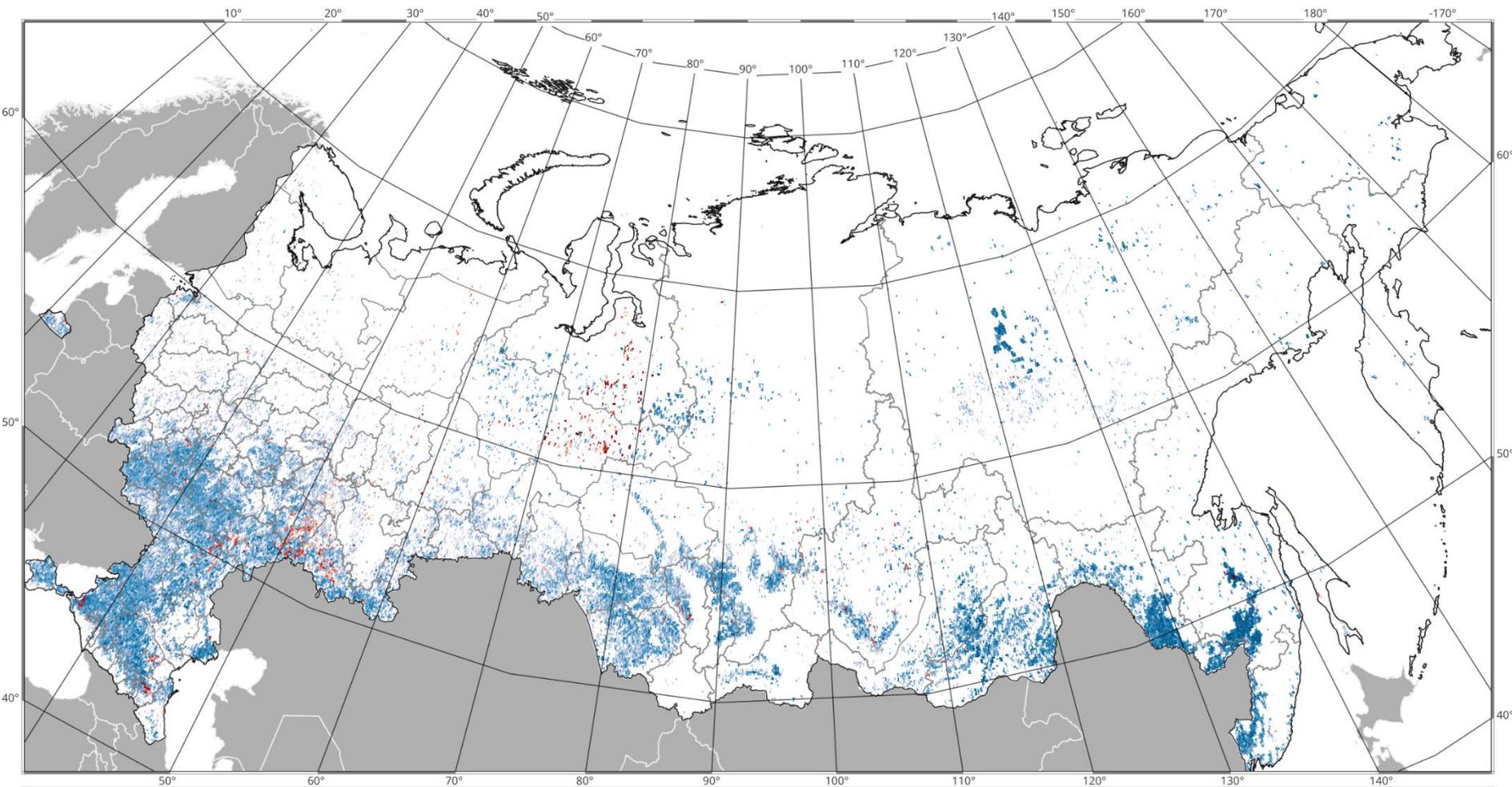
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

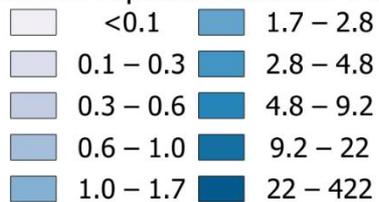


QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за 2005 г.

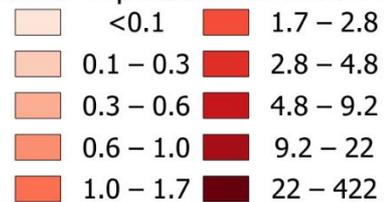


Эмиссия C, Tg:

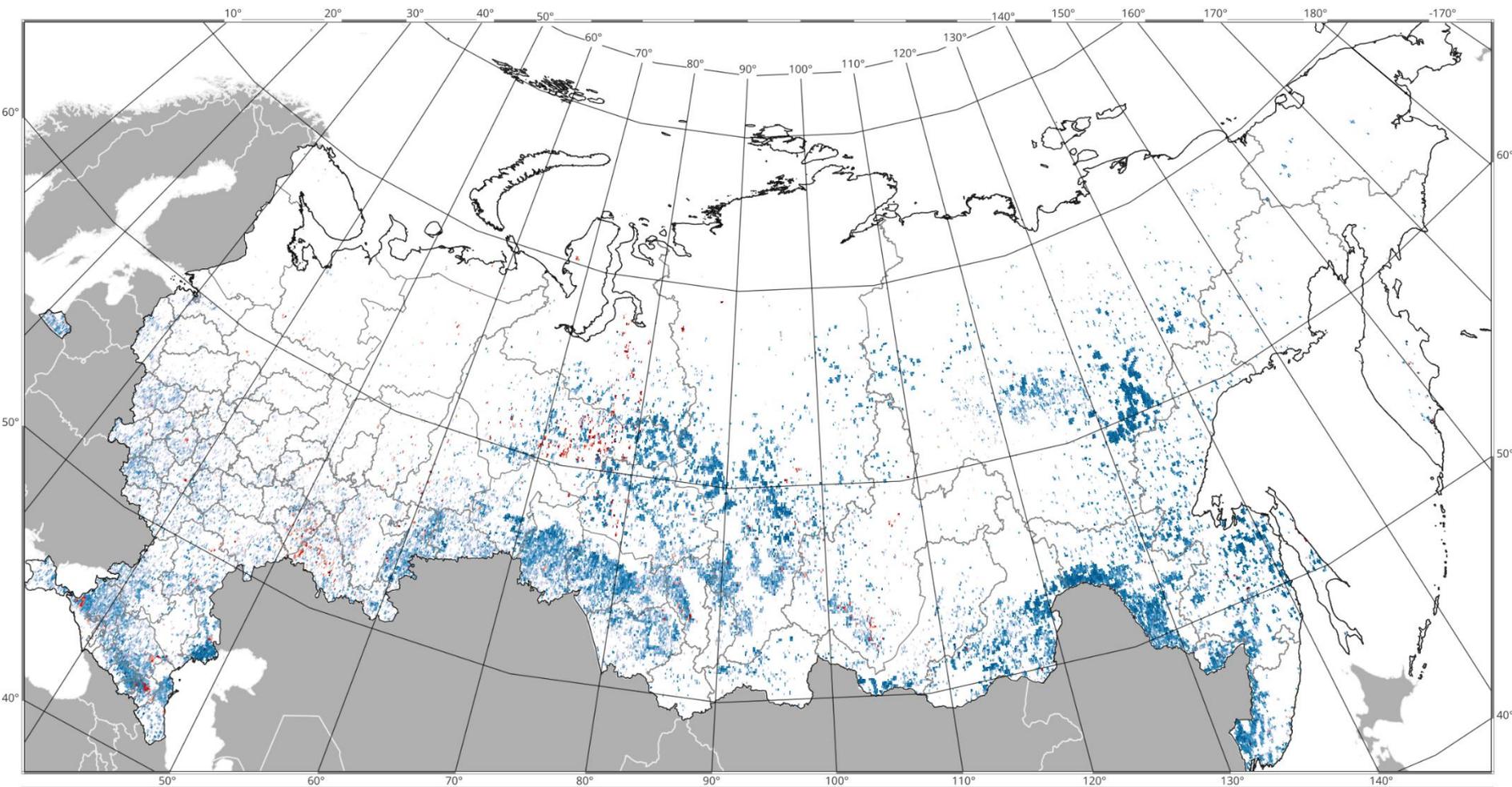
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

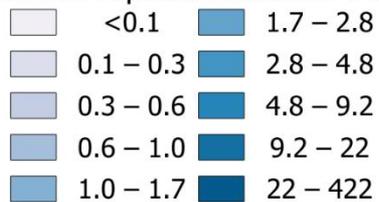


QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за 2012 г.

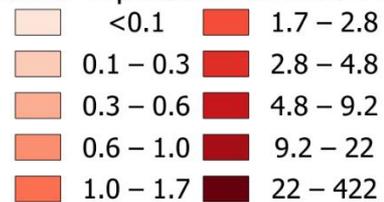


Эмиссия C, Tg:

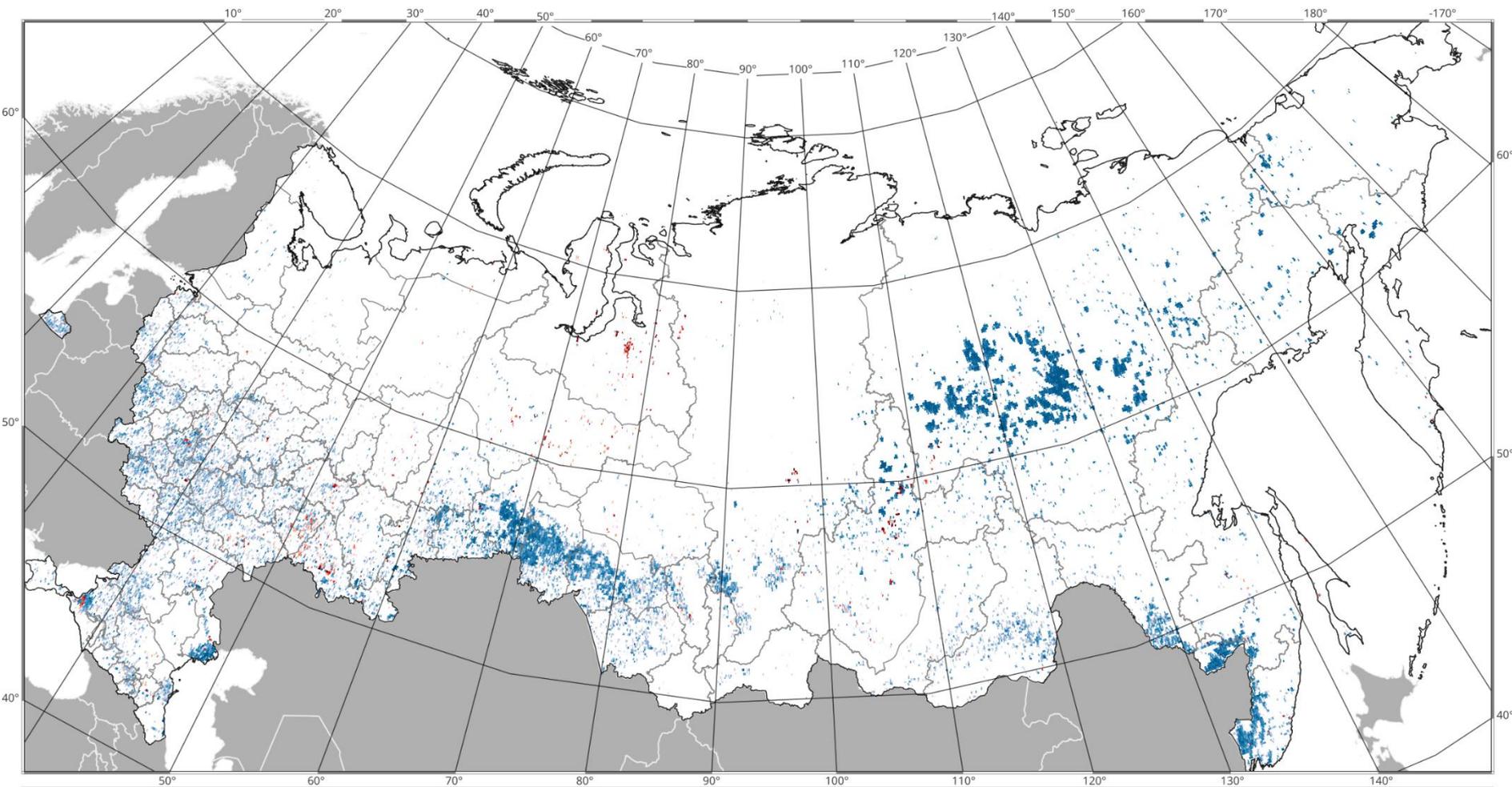
Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:

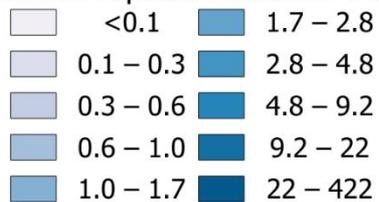


QFEDv2.5-r1: суммарная эмиссия углерода (C) за 2021 г.

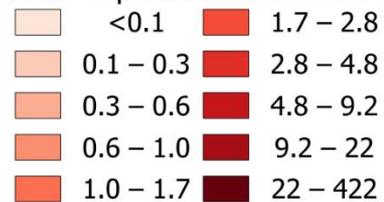


Эмиссия C, Tg:

Без стабильной термоаномалии VIIRS Nightfire:



Со стабильной термоаномалией VIIRS Nightfire:



Карты: наблюдения и замечания

- В случае *GFED v4.1s* данные VIIRS Nightfire не использованы в силу опоры GFED на оценку площадей гарей (а не на термоаномалии) и более низкого пространственного разрешения (как следствие, большего шанса попадания термоаномалии Nightfire в ячейку GFED).
- В продуктах *GFAS v1.2* и в большей степени *FEER-GFAS v1.2* наблюдаются артефакты в виде выпадающих ячеек сетки (значения в исходных данных равны nan) в течение всего времени наблюдений. Для FEER это привело к недооценке эмиссий от лесных пожаров в Якутии в 2021 г.
- В случае *GFAS v1.2* заметен большой вес лесных пожаров в суммарной эмиссии.
- Несмотря на выделение в отд. категорию стабильных термоаномалий в детекторе пожаров MOD14/MYD14 (исп. в *GFAS v1.2*, *FEER v1-G1.2* и *QFED v2.5-r1*), ячейки с крупнейшими объёмами эмиссий (см. табл. ниже) для них соответствуют газовым факелам нефтяных месторождений, металлургическим комбинатам или вулканам Камчатки. Только в *FINN v2.5*, опирающемся на детектор пожаров MCD14DL C6 (NASA FIRMS), ячейки с максимальной эмиссией чаще соответствуют лесным пожарам или объектам ЛПК (лесопромышленного комплекса).

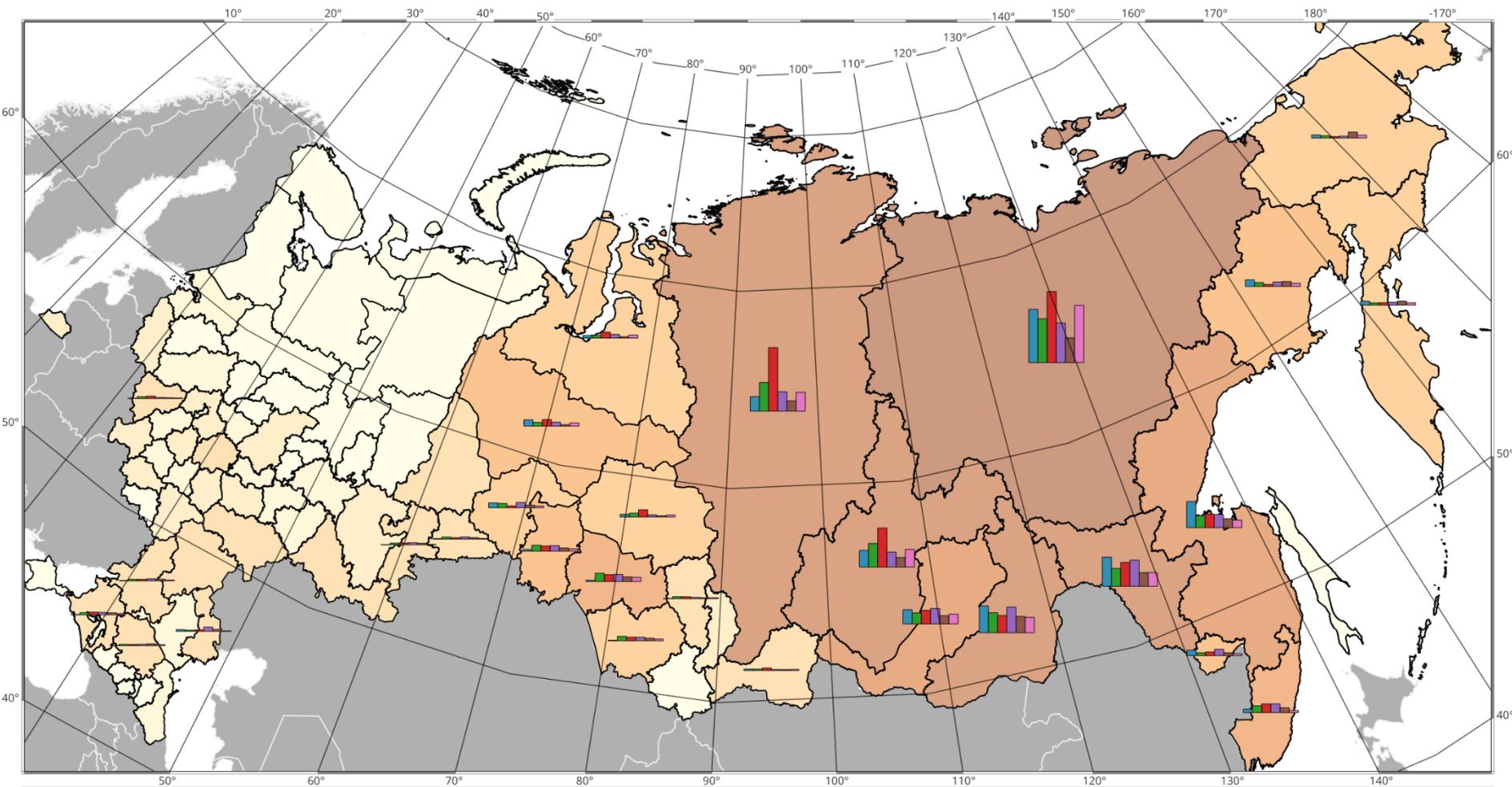
	FEERv1.0-G1.2	FINN v2.5 (MODIS)	FINN v2.5 (MODIS + VIIRS)	GFAS v1.2	QFED v2.5-r1
1	Ванкорское м/р	—	вулк. Плоский Толбачик	вулк. Плоский Толбачик	вулк. Шивелуч
2	Ванкорское м/р	—	Новолипецкий МК	Самотлорское м/р	вулк. Шивелуч
3	Новопортовское м/р	—	Юрубчено-Тохомское м/р	Ванкорское м/р	Магнитогорский МК
4	вулк. Плоский Толбачик	Юрубчено-Тохомское м/р	"Северсталь"	Фёдоровское м/р	Лугинецкое м/р
5	Приобское (северное) м/р	—	Магнитогорский МК	Тагринское м/р	Западно-Сибирский МК
6	Нижнетагильский МК	—	—	Фёдоровское м/р	вулк. Кизимен
7	Восточно-Мессояхское м/р	—	—	Ванкорское м/р	Дулисьминское м/р
8	Фёдоровское м/р	Объект ЛПК	Новолипецкий МК	Приразломное м/р (ХМАО)	Челябинский МК
9	— (природные пожары)	Объект ЛПК	—	Приобское (северное) м/р	Дулисьминское м/р
10	Самотлорское м/р	—	Куюмбинское м/р	—	Верхнечонское м/р

Статистика эмиссии С за 2003–2021 гг. и доля стабильных термоаномалий по VIIRS Nightfire

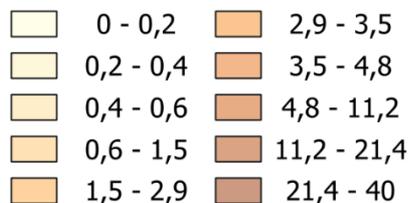
- Всего на территории России расположено 285 000 ячеек стороной 0.1°. Суммарно за период макс. перекрытия (2003–2021 гг.) методик в 40–43% ячеек фиксировались природные пожары.
- Высокая доля ячеек с эмиссией у *GFED* (66%) вызвана не столько более низким пространственным разрешением (0.25°), сколько более высоким числом детекций в период использования *ATSR/VIRS*: 25 000–27 000 (1997–2000 гг.) против 7 500–11 000 (2001–2023 гг.).
- Доля числа ячеек с природными пожарами в весенний и летний макс. примерно равна (20–22%).
- Годом с макс. числом ячеек с пожарами (14%) является 2003 г. (*FINN MODIS, QFED, GFED*) — год максимальной эмиссии С согласно всем методикам, кроме *GFED* (макс. в 2021 г.) — либо 2006 г. (*GFAS, FEER*: 12%). При этом 2006 г. не выделяется высокой эмиссией С — в этот год наблюдалась аномальная пожарная активность вне лесов России (юг Европейской части и Западной Сибири).
- Доля ячеек со стабильными термоаномалиями *VIIRS Nightfire* (т. е. источники, отличными от пожара) составляет 2.2–2.8%. На них приходится 2.1–6.6% эмиссии С, причём более высокие значения характерны для *GFAS, FEER, QFED*, опирающихся на детектор пожаров *MOD14/MYD14*. Более высокое значение для *GFED* связано с более низким пространственным разрешением.

Суммарно за 2003–2021 гг.		<i>GFAS v1.2</i>	<i>FINN v2.5 MODIS</i>	<i>FINN v2.5 MOD+VRS</i>	<i>FEER v1.0-GFASv1.2</i>	<i>QFED v2.5-r1</i>	<i>GFED v4.1s</i>
Ячейки с эмиссией, n	Всего	285093	285059	285059	285135	285135	44222
	С детекциями	115640	121365	106146	114447	123365	29316
	С детекциями, %	40.6%	42.6%	37.2%	40.1%	43.3%	66.3%
Ячейки с VNF, n	Ячейки с VNF	2593	2720	2940	2594	2786	1557
	Ячейки с VNF, %	2.2%	2.2%	2.8%	2.3%	2.3%	5.3%
Эмиссия С, Тг	Всего	3755	3903	2333	4052	2595	2869
	Ячейки с VNF	190	82	66	266	111	129
	Ячейки с VNF, %	5.1%	2.1%	2.9%	6.6%	4.3%	4.5%

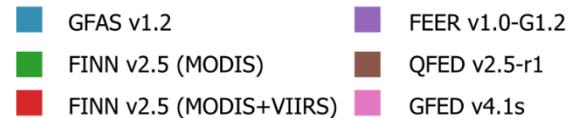
Усреднённая ежегодная эмиссия углерода (С) по регионам России, 2003–2021 гг.



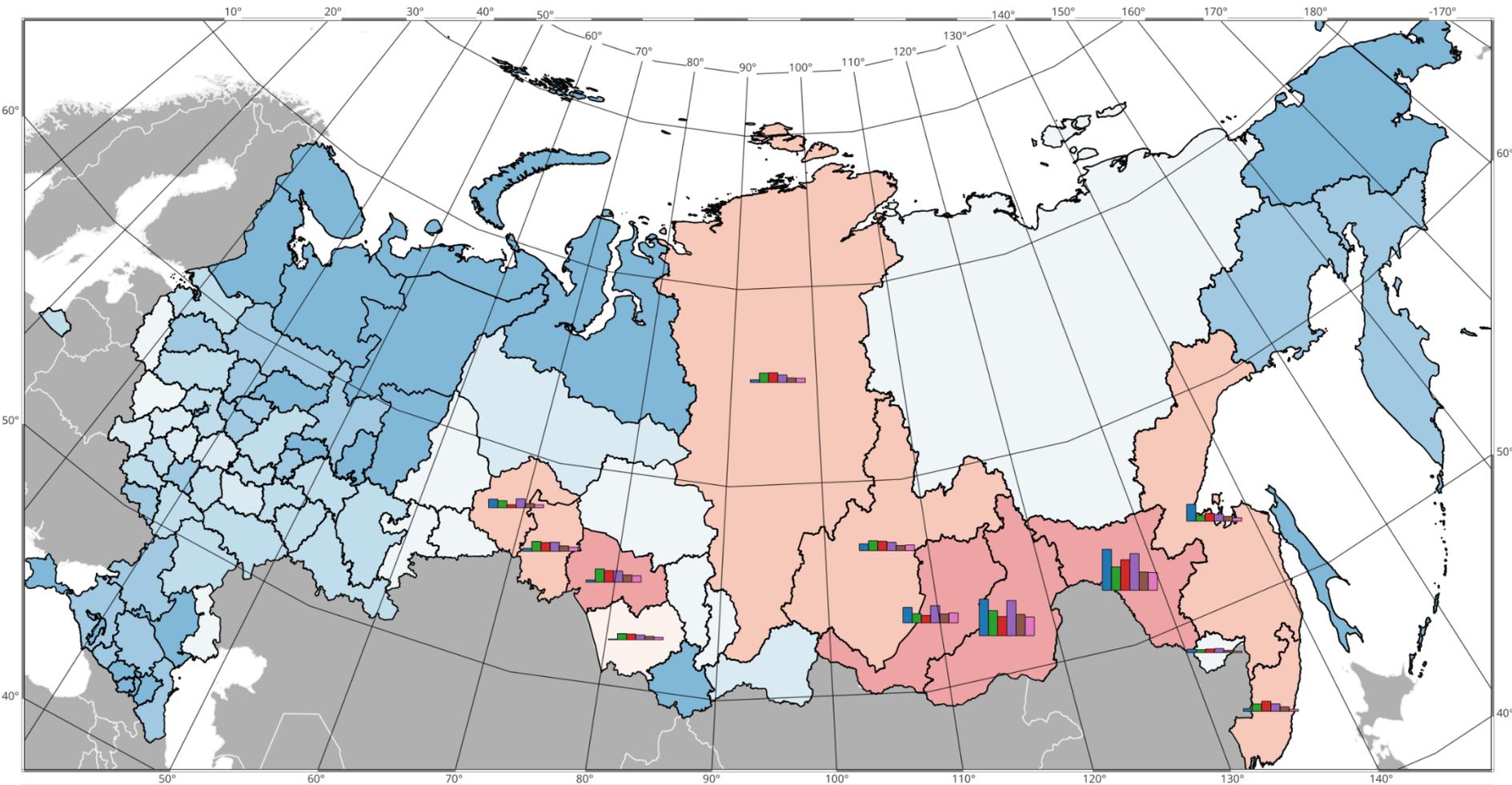
Среднегодовая эмиссия С, Тг:



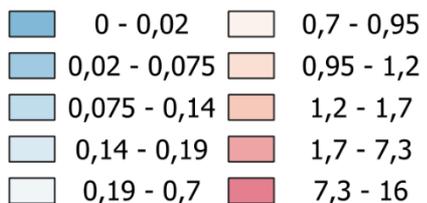
Эмиссия С согласно продукту:



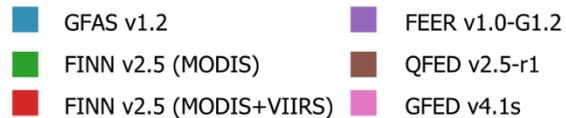
Усреднённая за апрель-май эмиссия С по регионам России, 2003–2021 гг.



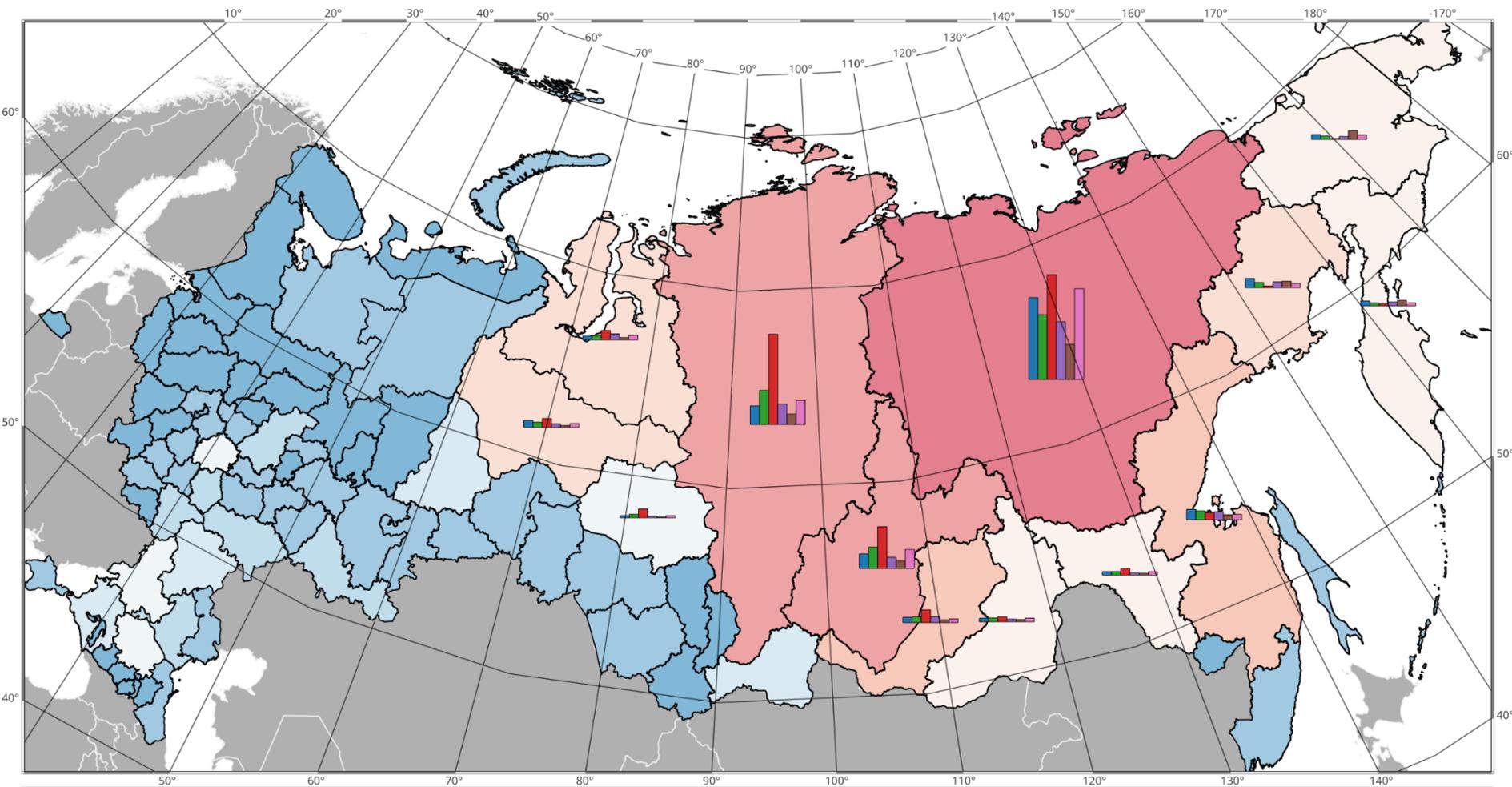
Среднемесячная эмиссия С, Тг:



Эмиссия С согласно продукту:



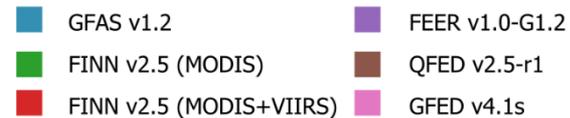
Усреднённая за июль-август эмиссия С по регионам России, 2003–2021 гг.



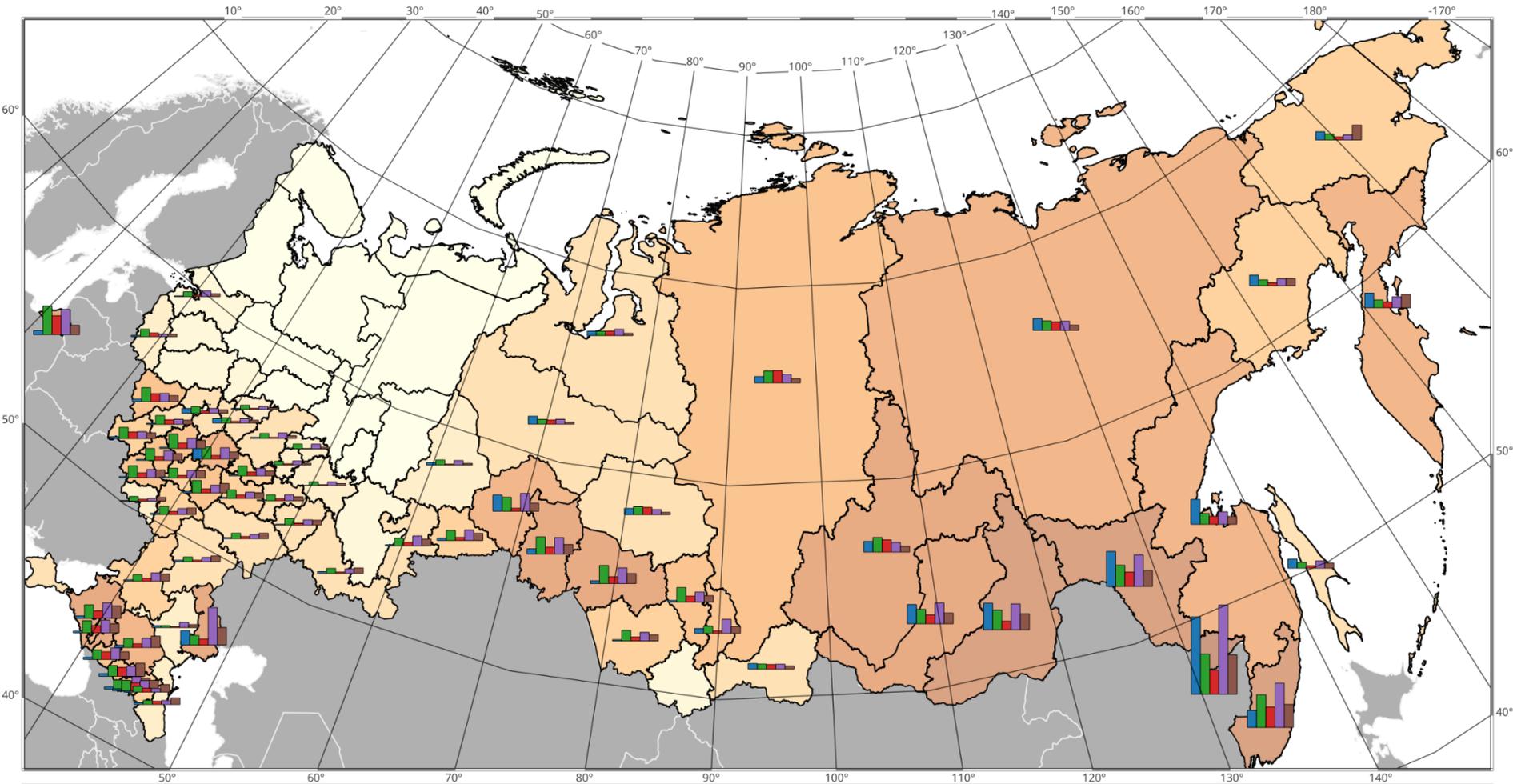
Среднемесячная эмиссия С, Тг:



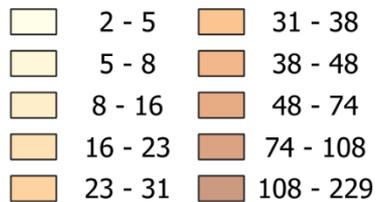
Эмиссия С согласно продукту:



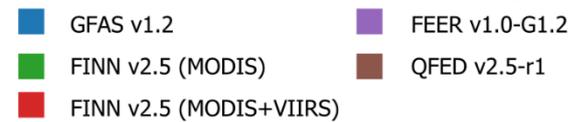
Усреднённая годовая эмиссия С на ячейку 0.1° по регионам России, 2003–2021 гг.



Среднегодовая эмиссия С на ячейку 0.1°, Гг:

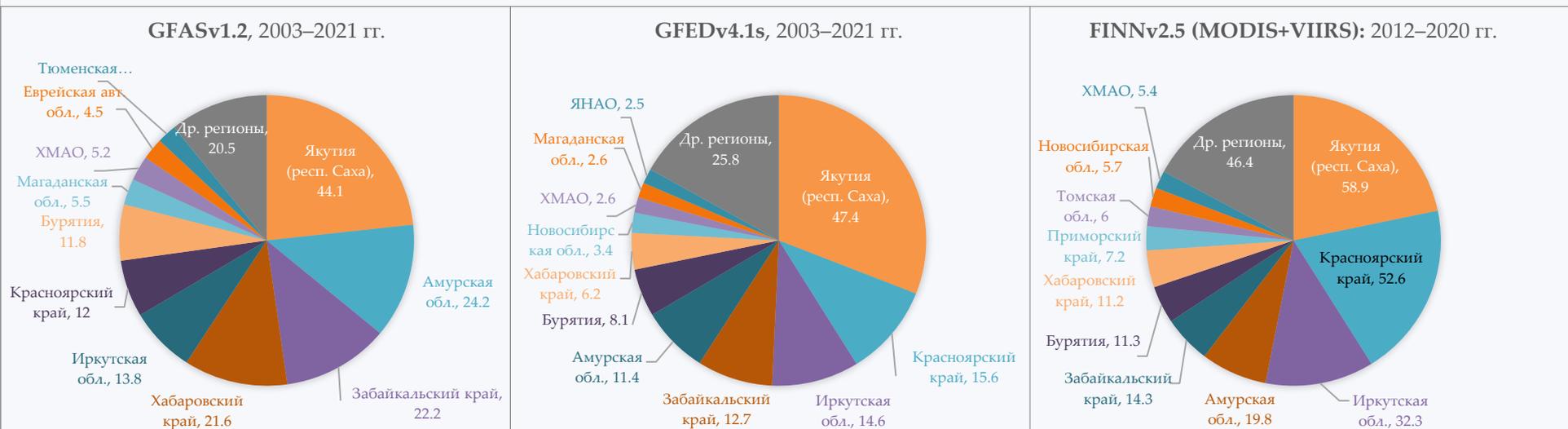


Эмиссия С согласно продукту:

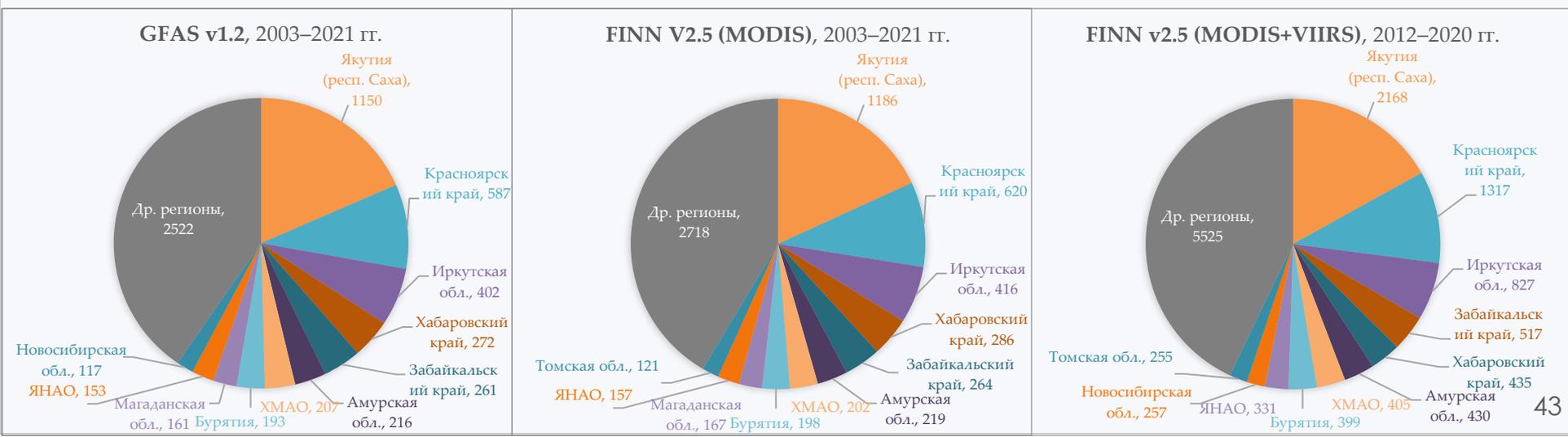


Региональная статистика (с фильтрацией Nightfire): Доля регионов в среднегодовой эмиссии С

Среднегодовая эмиссия С, Тг:

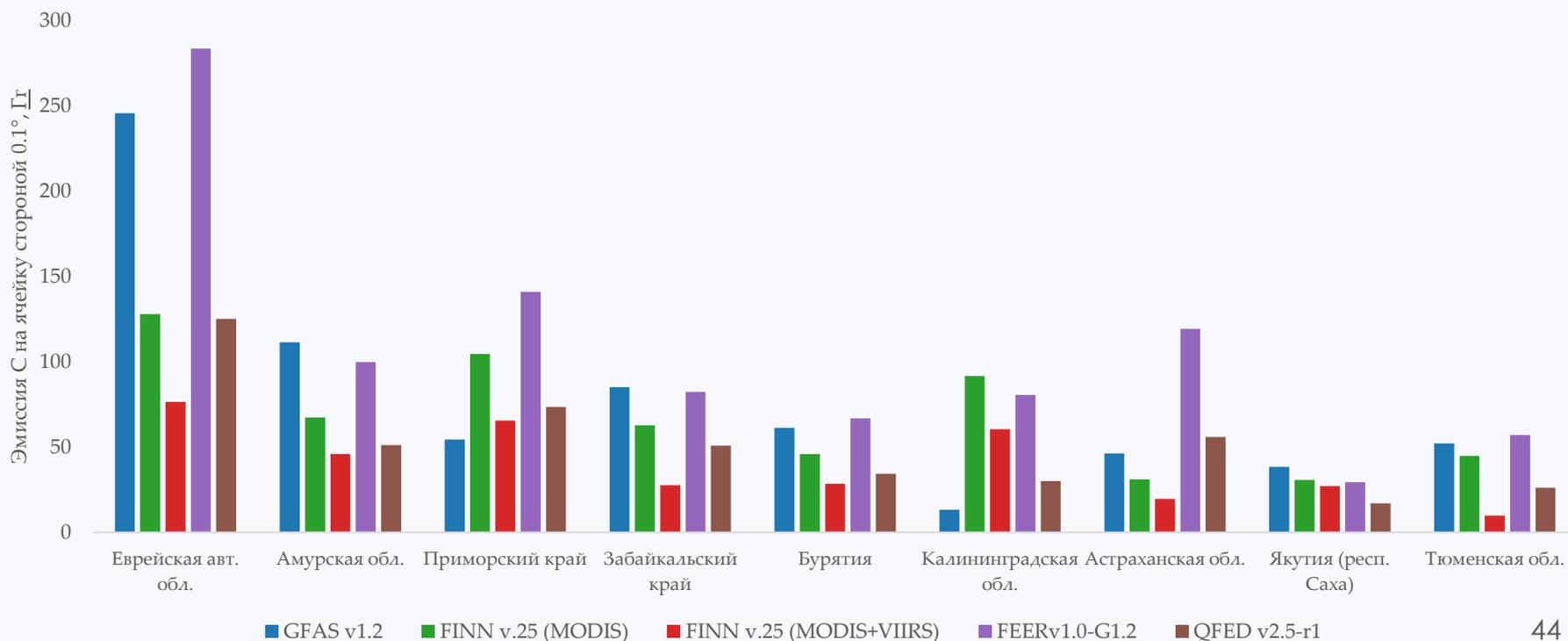


Среднегодовое число ячеек (стороной 0.1°), содержащих эмиссии С:

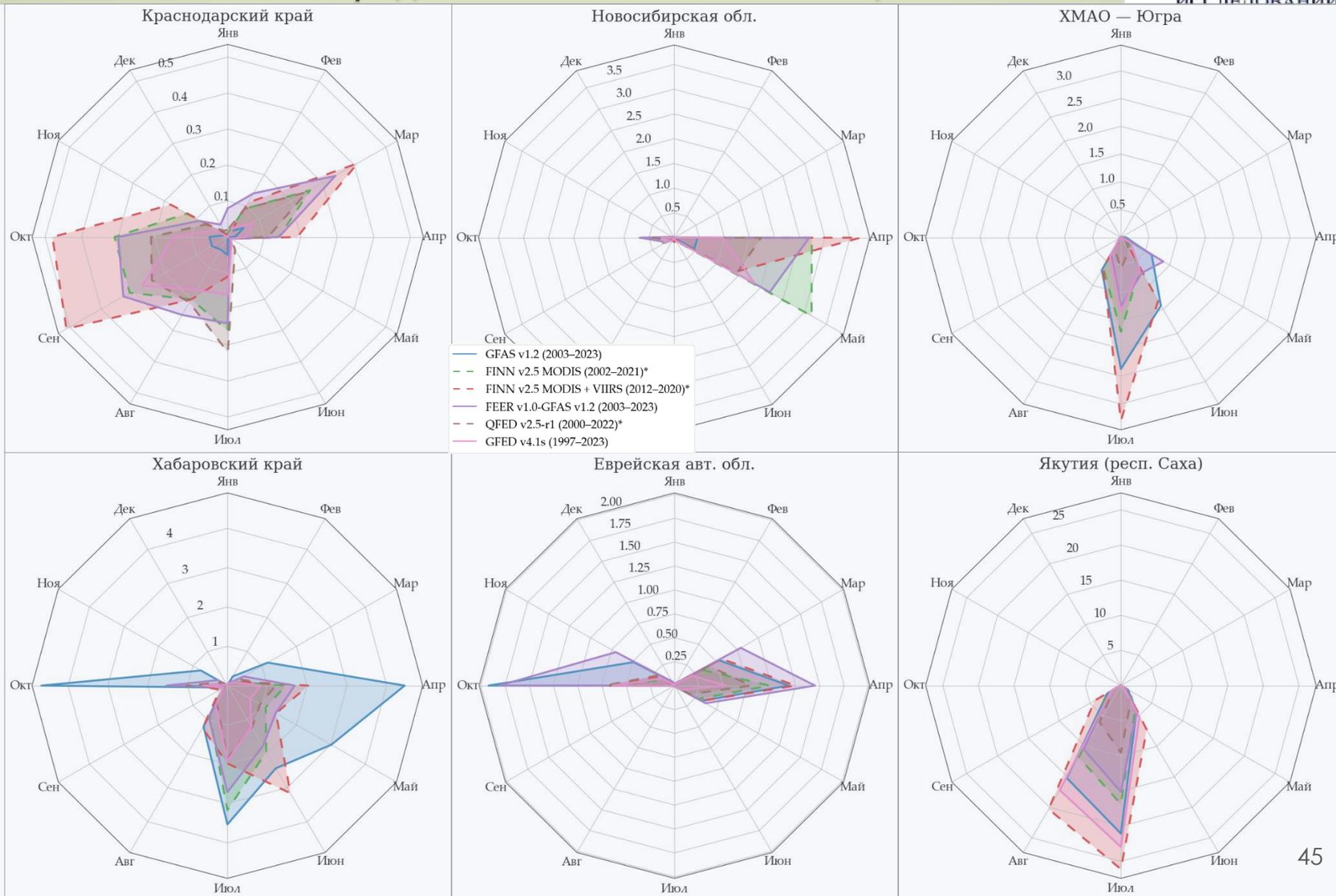


Региональная статистика: Усреднённая эмиссия на ячейку стороной 0.1°

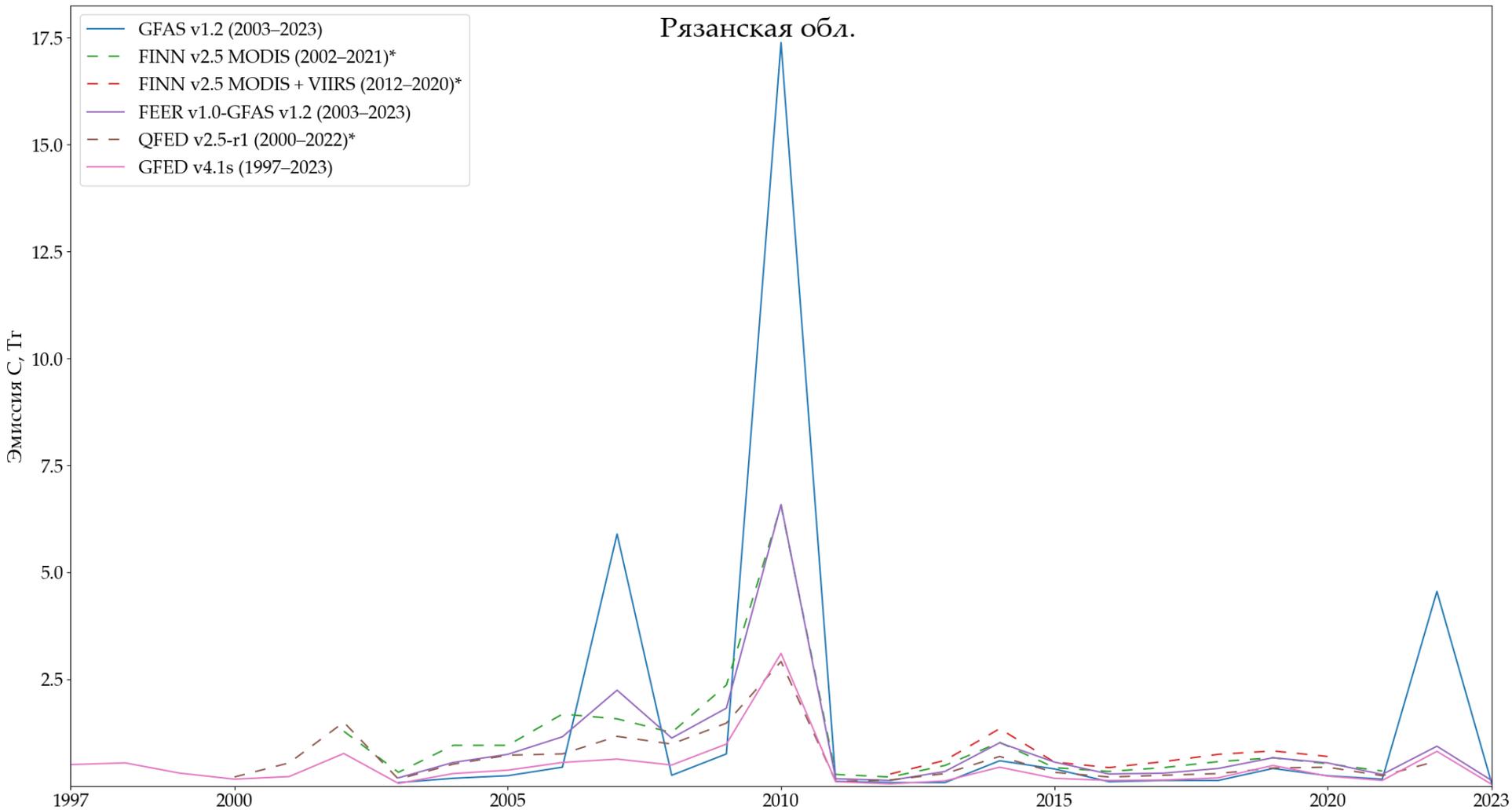
- В случае региональных данных для всех рассмотренных продуктов, исключая GFED v4.1s, отфильтрованы ячейки, содержащие стабильную термоаномалию VIIRS Nightfire.
- [Макс. эмиссия C](#) приходится на регионы Восточной Сибири и Дальнего Востока — ок. 75% всей эмиссии C от природных пожаров в России; регионом с максимумом эмиссии C является Якутия.
- Макс. эмиссия на одну ячейку сетки стороной 0.1° приходится на регионы Приамурья и Приморья. Интересны высокие оценки на ячейку в Астраханской обл. в случае продуктов, применяющих оценку эмиссии аэрозолей (*FEER* и *QFED*).



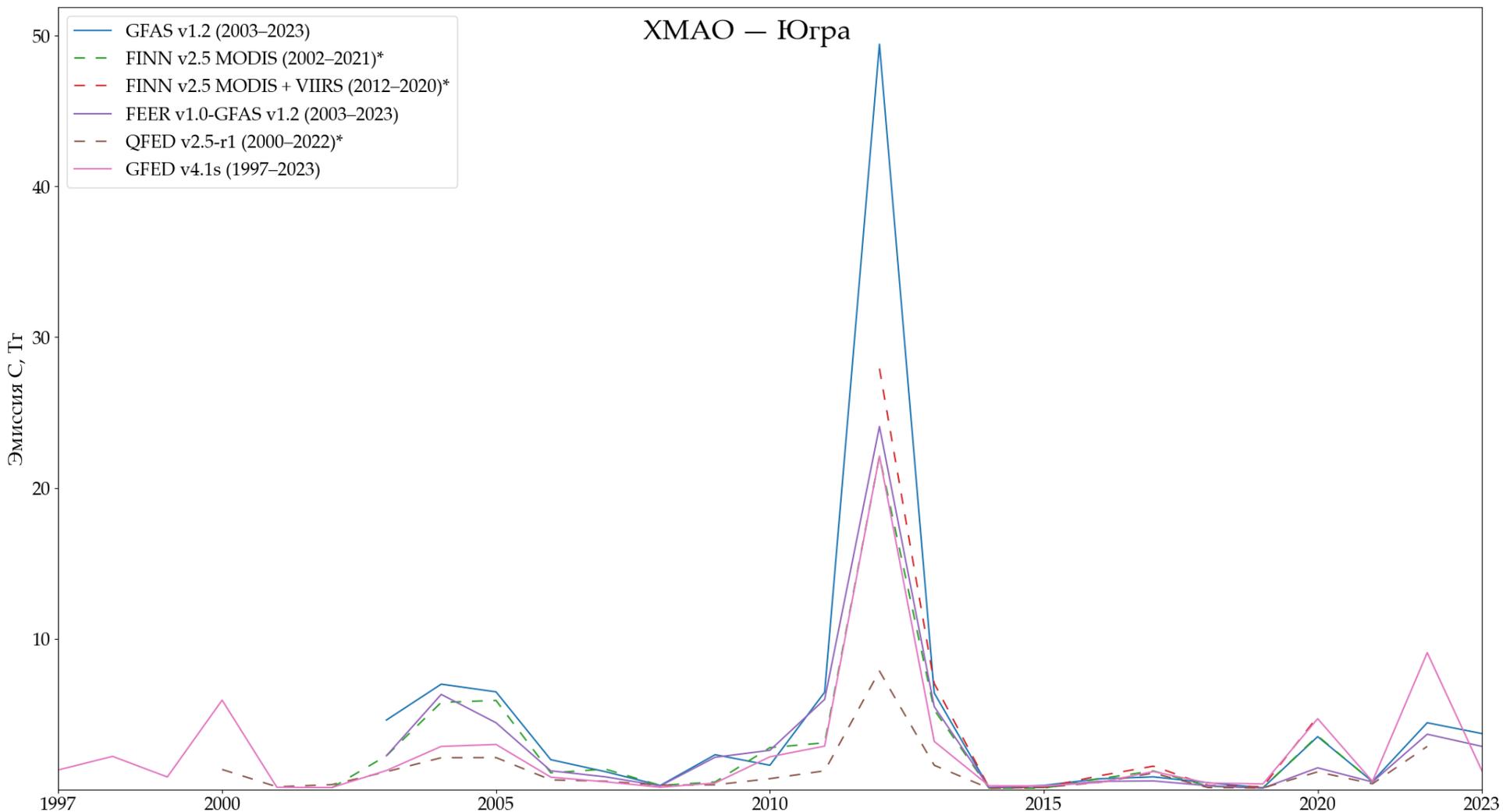
Региональная статистика (с фильтрацией Nightfire): Усреднённая эмиссия по месяцам



Региональная статистика: График годовой эмиссии С, Рязанская обл.

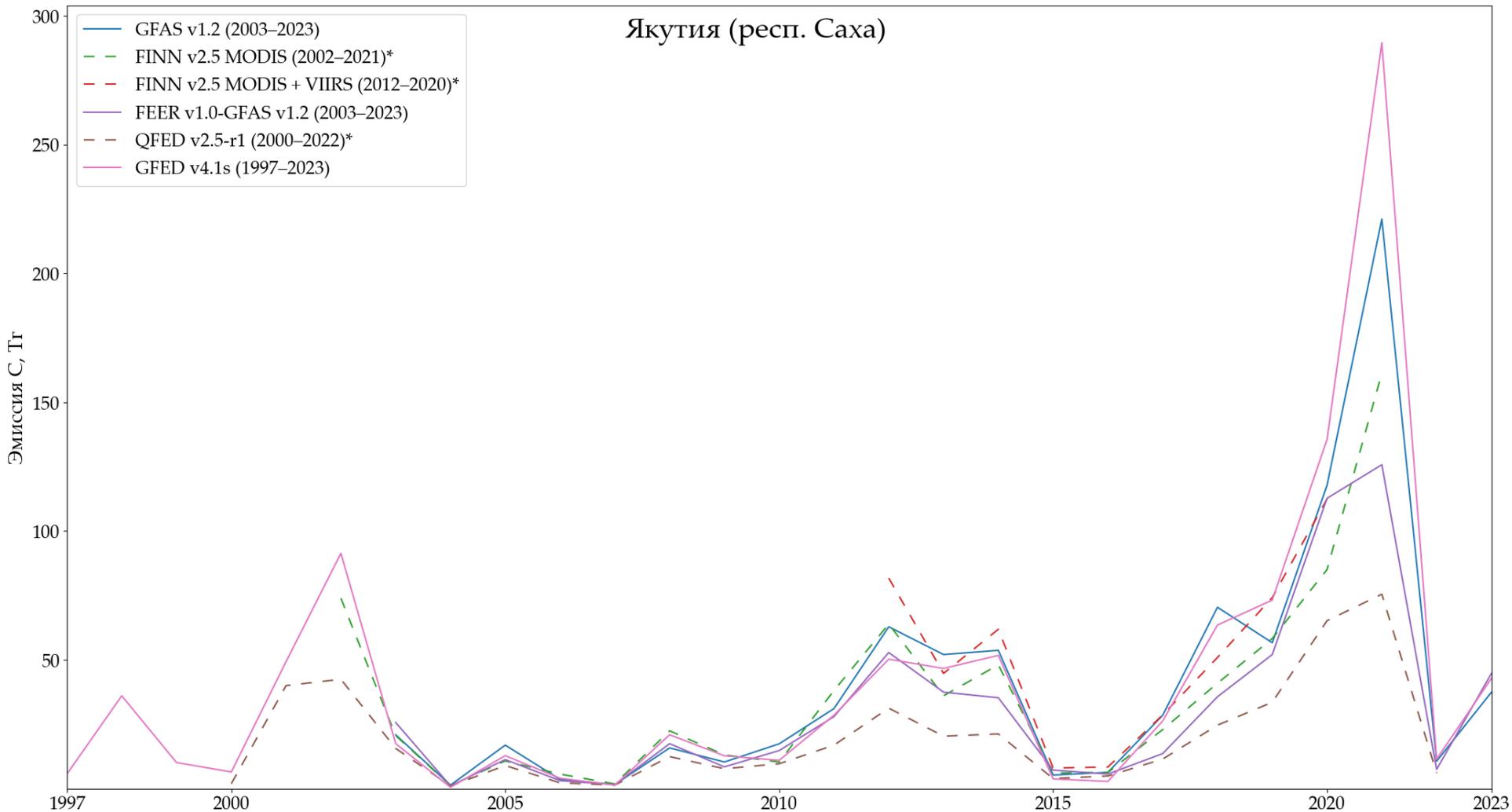


Региональная статистика: График годовой эмиссии С, Ханты-Мансийский АО — Югра



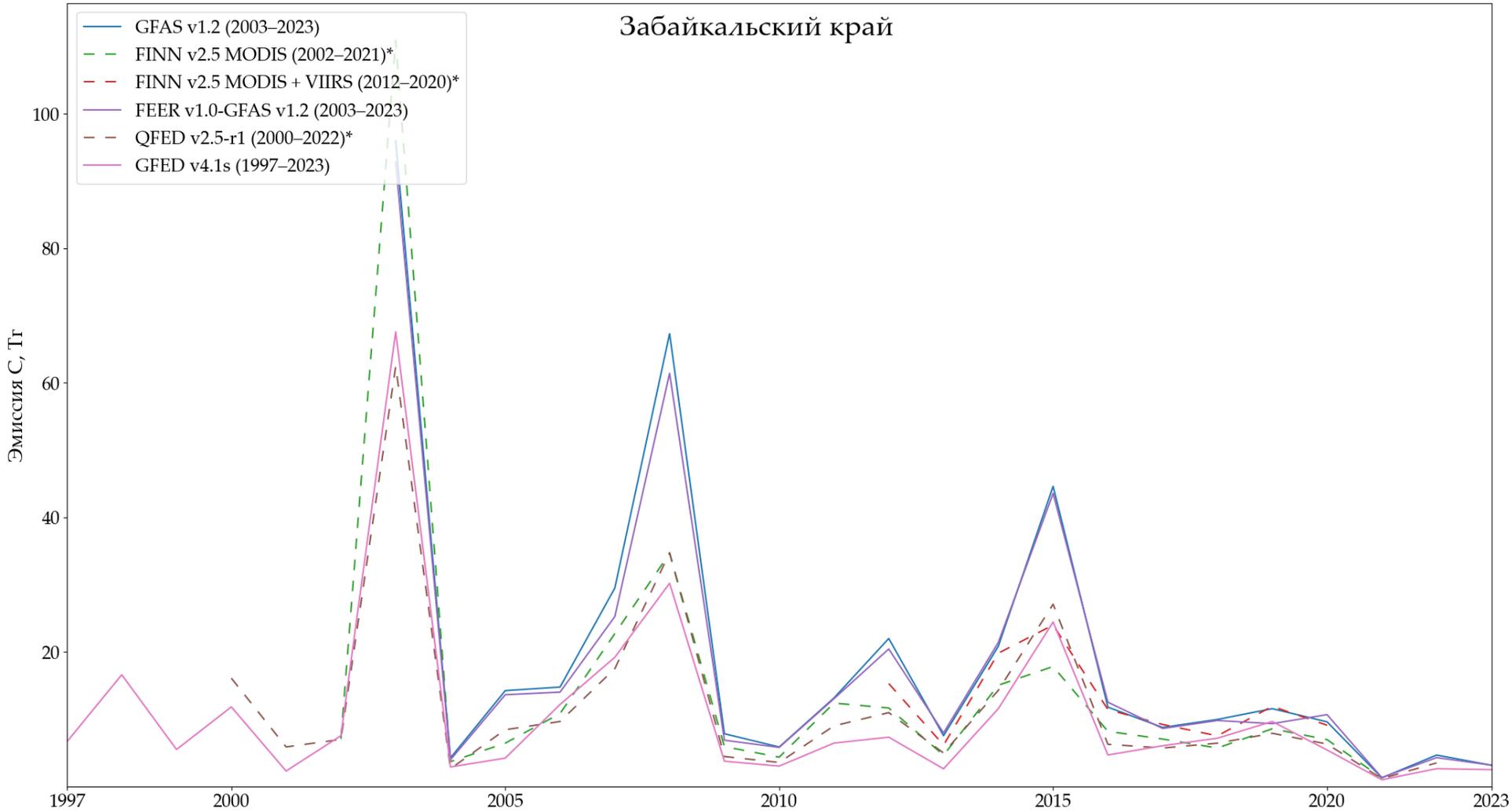
* Пунктиром — эмиссии С, рассчитанные по атомарной массе [CO₂, CO, CH₄, BC, OC]

Региональная статистика: График годовой эмиссии С, Якутия



* Пунктиром — эмиссии С, рассчитанные по атомарной массе [CO₂, CO, CH₄, BC, OC]

Региональная статистика: График годовой эмиссии С, Забайкальский край



Региональная статистика: Наблюдения

- Выделяется общая согласованность трендов наблюдений методик по годам и по месяцам. Тем не менее, существуют исключения вроде повышенной чувствительности методик *FEER* к пожарам в Астраханской обл., в среднем более низких оценках *GFED v4.1s* вне лесной зоны России или *QFED* в лесной зоне.
- В большинстве случаев наблюдается закономерность приуроченности эмиссий углерода к регионам с высокой сельхоз-активностью в весенние месяцы (в некоторые случае — и в октябре) при пике регионов с лесными пожарами в летний период. Примеров регионов с пиками в весенний и летний периоды немного (Хабаровский край, Бурятия).
- Практически отсутствующие эмиссии в ХМАО на Камчатке в весенний или осенний периоды, вероятно, указывают на относительно успешную фильтрацию газовых факелов на нефтегазовых месторождениях или вулканов на основе стабильных термоаномалий VIIRS Nightfire.
- Все алгоритмы фиксируют всплеск эмиссии от природных пожаров в центральной полосе Европейской части России в 2010 г. (Московская, Рязанская, Владимирская, Нижегородская обл.).
- В Западной Сибири (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий АО, Томская обл.) ярко выраженный пик пожарной активности и эмиссии углерода приходится на 2012 г.
- Лесные пожары в Якутии в 2021 г. стали беспрецедентными с точки зрения эмиссии углерода, превысив собственные пиковые эмиссии и пики других регионов (Красноярский, Забайкальский, Хабаровский край) за всё время наблюдений более чем в 2.5 раза.

Список литературы

- Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., van der Werf G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences* **2012**, 9, 527–554, <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>.
- Mieville A., Granier C., Liousse C., Guillaume B., Mouillot F., Lamarque, J.-F., Grégoire, J.-M., Pétron G. Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction. *Atmos. Environ.* **2010**, 44, 1469–1477, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.01.011.
- Wiedinmyer C., Kimura Y., McDonald-Buller E.C., Emmons L.K., Buchholz R.R., Tang W., Seto K., Joseph M.B., Barsanti K.C., Carlton A.G., Yokelson R. The Fire Inventory from NCAR version 2.5: an updated global fire emissions model for climate and chemistry applications. *Geosci. Model Dev.* **2023**, 16, 3873–3891, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-3873-2023>.
- Ichoku C., Ellison L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. *Atmos. Chem. Phys.* **2014**, 14, 6643–6667, <https://doi.org/10.5194/acp-14-6643-2014>.
- Darmenov A., da Silva A. The quick fire emissions dataset (QFED) – Documentation of versions 2.1, 2.2, and 2.4. NASA//TM-2015-104606, **2015**, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Darmenov796.pdf>.
- van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst. Sci. Data*, **2017**, 9, 697–720, <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.
- Liu T., Mickley L.J., Marlier M.E., DeFries R.S., Khan M.F., Latif M.T., Karambelas A. Diagnosing spatial biases and uncertainties in global fire emissions inventories: Indonesia as regional case study. *Remote Sens.* **2020**, 237, 111557. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111557>. GitHub URL: https://github.com/tianjialiu/FIRECAM/tree/main/fire_inv.
- Zhizhin M., Matveev A., Ghosh T., Hsu F.-C., Howells M., Elvidge C. Measuring Gas Flaring in Russia with Multispectral VIIRS Nightfire. **2021**, *Remote Sens.*, 13, 3078, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13163078>.