

ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«Технологическое развитие отраслей ТЭК для  
достижения углеродной нейтральности экономики  
России»

# Россия на пути к климатической нейтральности: противостояние леса и энергетики

Академик РАН  
В.В.Клименко,  
руководитель

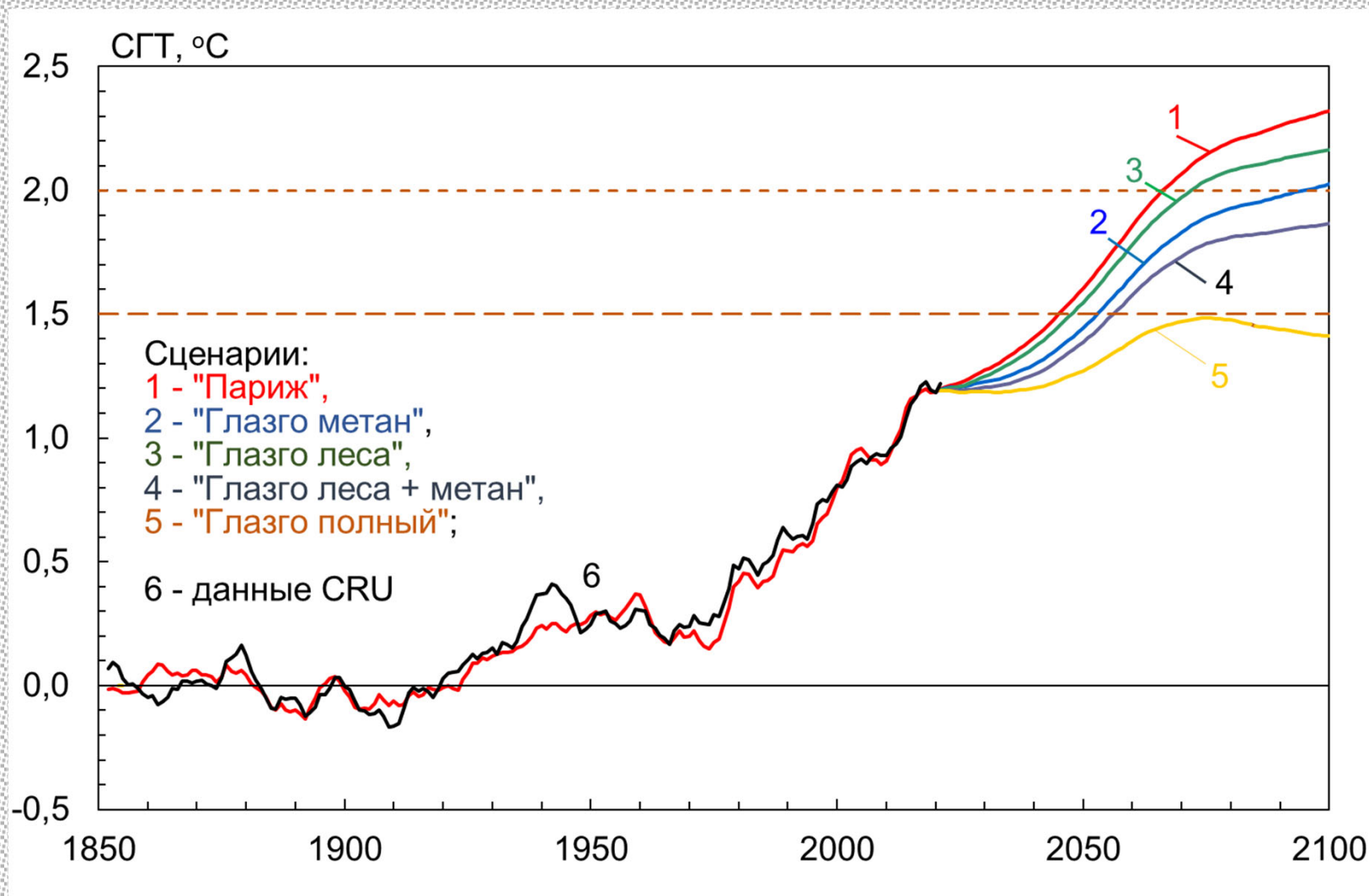
НИЛ глобальных проблем энергетики МЭИ  
т. (495) 362-71-27; nilgpe@mpei.ru

Москва, ИНЭИ РАН, 17 октября 2023 г.

## Пакт Глазго, 2021

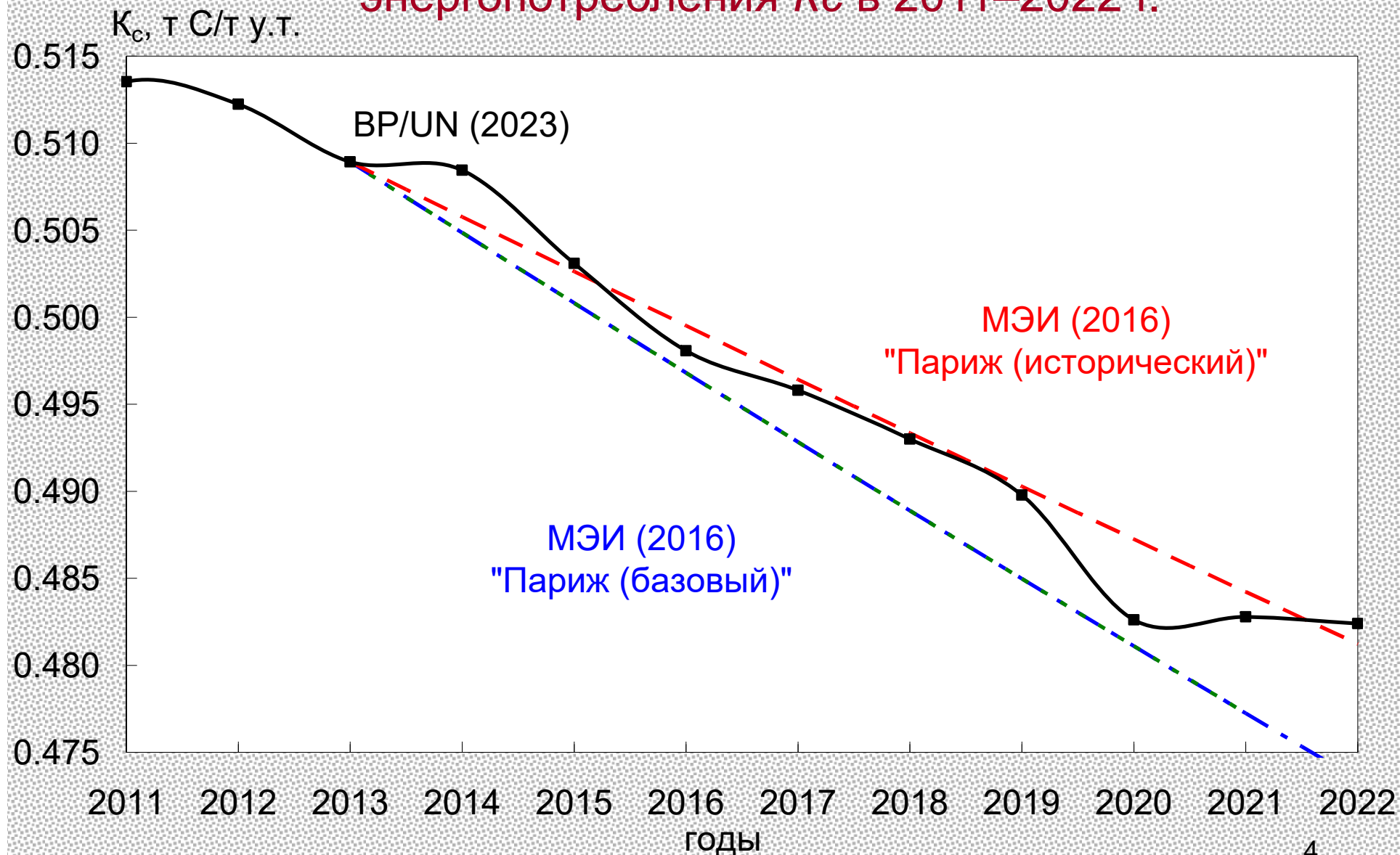
- 1) Достичь так называемой климатической нейтральности, т.е. нулевой нетто-эмиссии, в промежуток времени между 2050 и 2070 гг. в большинстве стран, включая все крупнейшие страны–эмитенты парниковых газов (США и ЕС к 2050 г., Россия и Китай к 2060 г., Индия к 2070 г.)
- 2) Снизить антропогенную эмиссию метана, второго по значению парникового компонента атмосферы, на 30% к 2030 г. (Глобальное обязательство по метану). Первоначально 109 стран взяли на себя это обязательство, сегодня уже 150 стран присоединилось к нему, но четыре крупнейших эмитента (Иран, Индия, Китай и Россия), ответственные за 34% глобальной эмиссии, пока воздерживаются от участия в этой инициативе
- 3) Остановить утрату лесов к 2030 г. и в дальнейшем приступить к их восстановлению. Сегодня в этом обязательстве участвуют уже 145 стран, обладающие 91% площади лесов планеты

# Изменение СГТ по модельным расчетам и историческим данным, усредненным за пятилетия (в сравнении со средними значениями за 1850–1900 гг.)

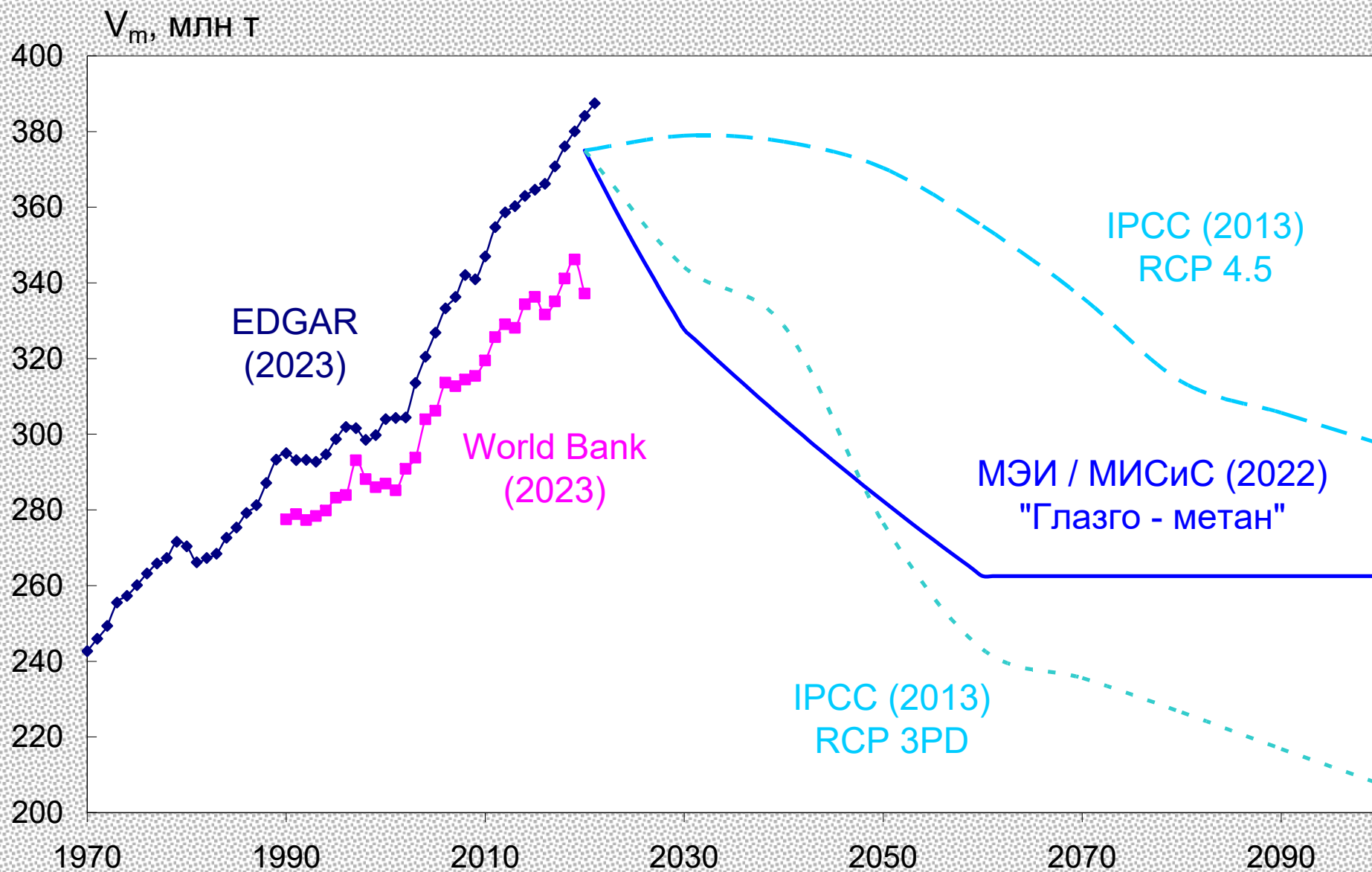


Источники: варианты 1-5 – расчеты авторов; кривая 6 – данные CRU, 2023

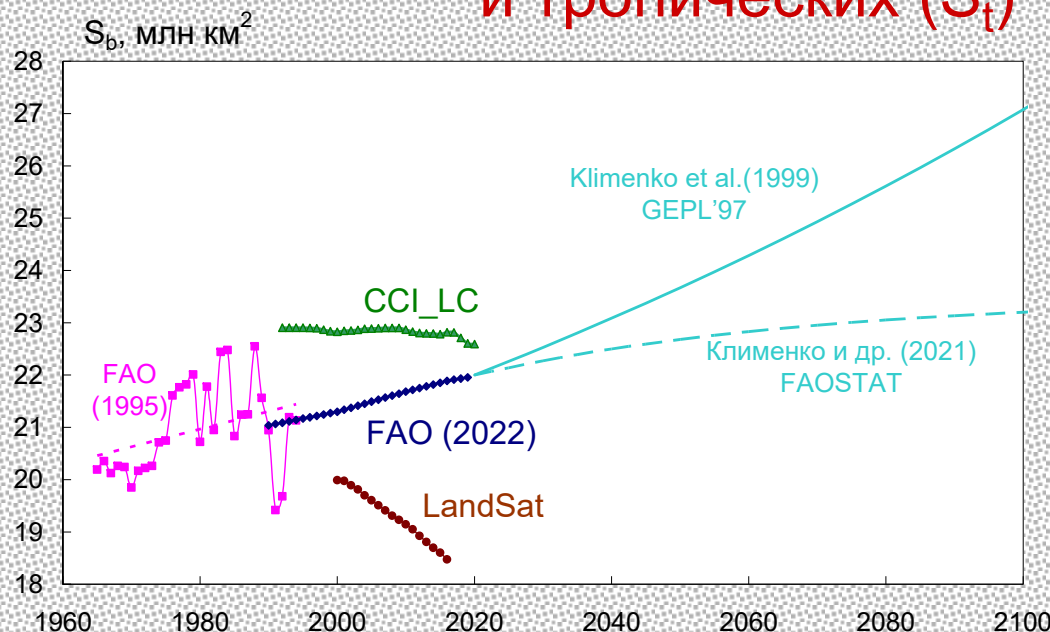
## Изменения углеродной интенсивности мирового энергопотребления $K_c$ в 2011–2022 г.



# Мировая эмиссия метана $V_m$ : данные инвентаризаций и сценарии



# Изменение площади умеренно-бореальных ( $S_b$ ) и тропических ( $S_t$ ) лесов мира



## Сценарии:

Глазгоподобный (*Klimenko et al. (1999)*)

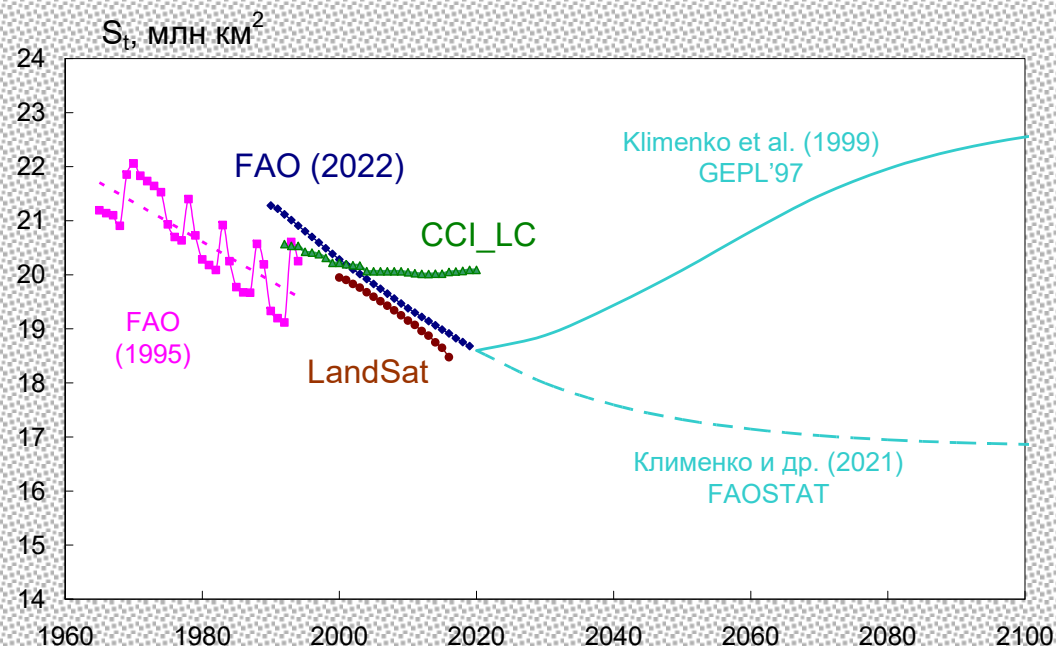
Инерционный (Климченко и др., 2021)

## Данные:

инвентаризаций FAO 1995 г. и 2020 г.;

дистанционного зондирования Земли CCI\_LC и LandSat

Источник: FAO (2022)



# Добровольные обязательства по снижению эмиссии парниковых газов сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК)

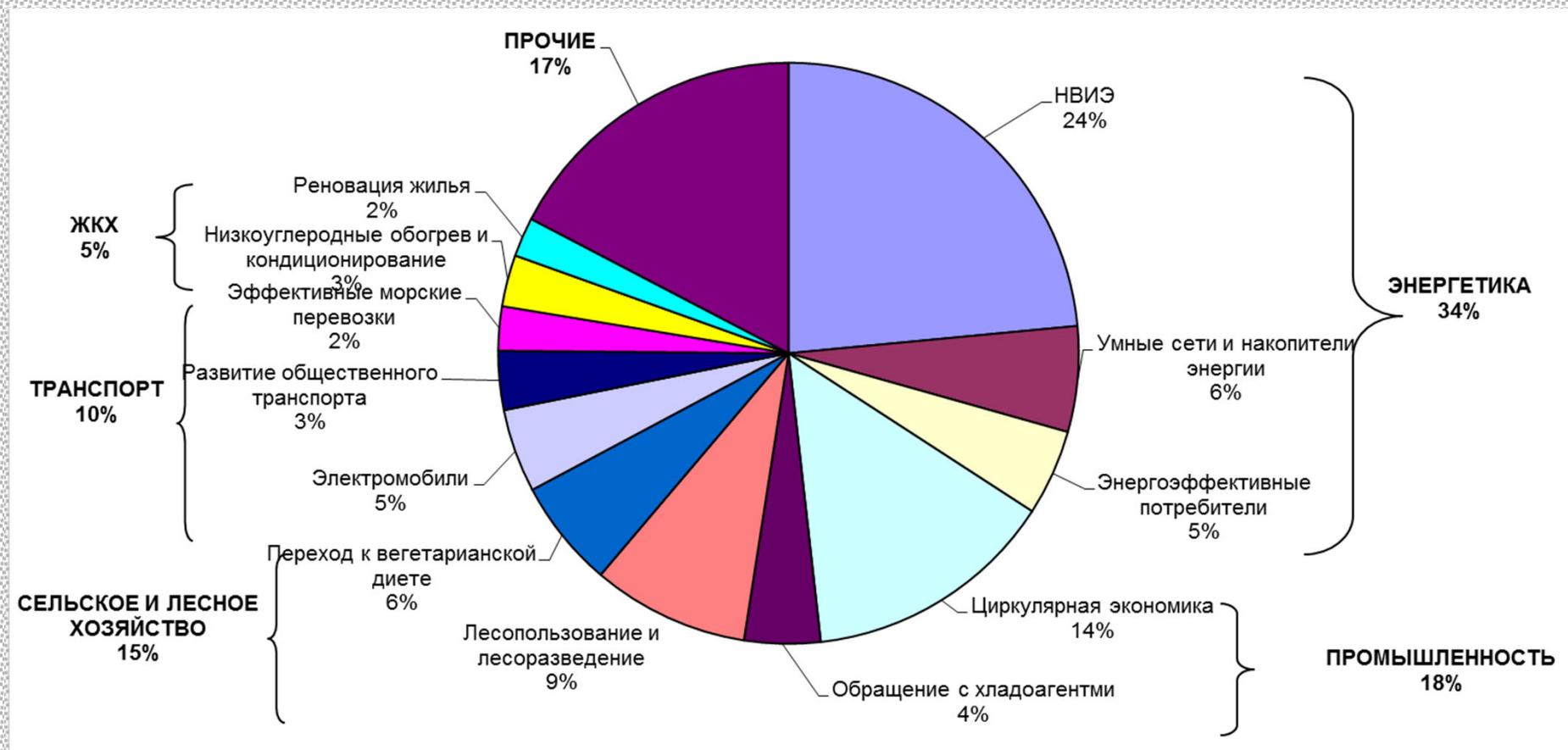
| Сторона<br>РКИК | Базовый<br>год | Эмиссия, в % к базовому году |                 |                 |           | Эмиссия на<br>единицу<br>ВВП, в % к<br>базовому<br>году | Год достижения<br>пика эмиссии |
|-----------------|----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                 |                | в 2030 г.                    | в<br>2040<br>г. | в 2050 г.       | в 2060 г. |                                                         |                                |
| Россия          | 1990           | 70-75( <b>52</b> )           |                 | <b>20</b>       | <b>0</b>  |                                                         | 1990                           |
| США             | 2005           | 72-74 ( <b>48-50</b> )       |                 | 20 ( <b>0</b> ) |           |                                                         | 2007                           |
| ЕС              | 1990           | 60 ( <b>45</b> )             |                 | 5 ( <b>0</b> )  |           |                                                         | 1990                           |
| Китай           | 2005           | 175                          |                 | <b>55</b>       | <b>0</b>  | 35-40 ( <b>35</b> )                                     | до 2030                        |
| Индия           | 2005           | 100                          |                 | <b>62</b>       | <b>30</b> | 65-67                                                   | до 2025                        |
| Канада          | 2005           | 70 ( <b>55-60</b> )          |                 | 20 ( <b>0</b> ) |           |                                                         | 2007                           |
| Япония          | 2005           | 76 ( <b>54</b> )             |                 | ( <b>0</b> )    |           |                                                         | 2013                           |
| Норвегия        | 2005           | 45-50                        |                 | 0               |           |                                                         | 2004                           |
| Швеция          | 2005           |                              | 0               |                 |           |                                                         | 2003                           |
| Нидерланды      | 2005           |                              | 0               |                 |           |                                                         | 2004                           |
| Бразилия        | 2005           | 57                           |                 | 19              | <b>0</b>  |                                                         | 2014                           |

Источник:

UNFCCC (2021) INDCs as communicated by Parties

<https://www4.unfccc.int/sites/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>

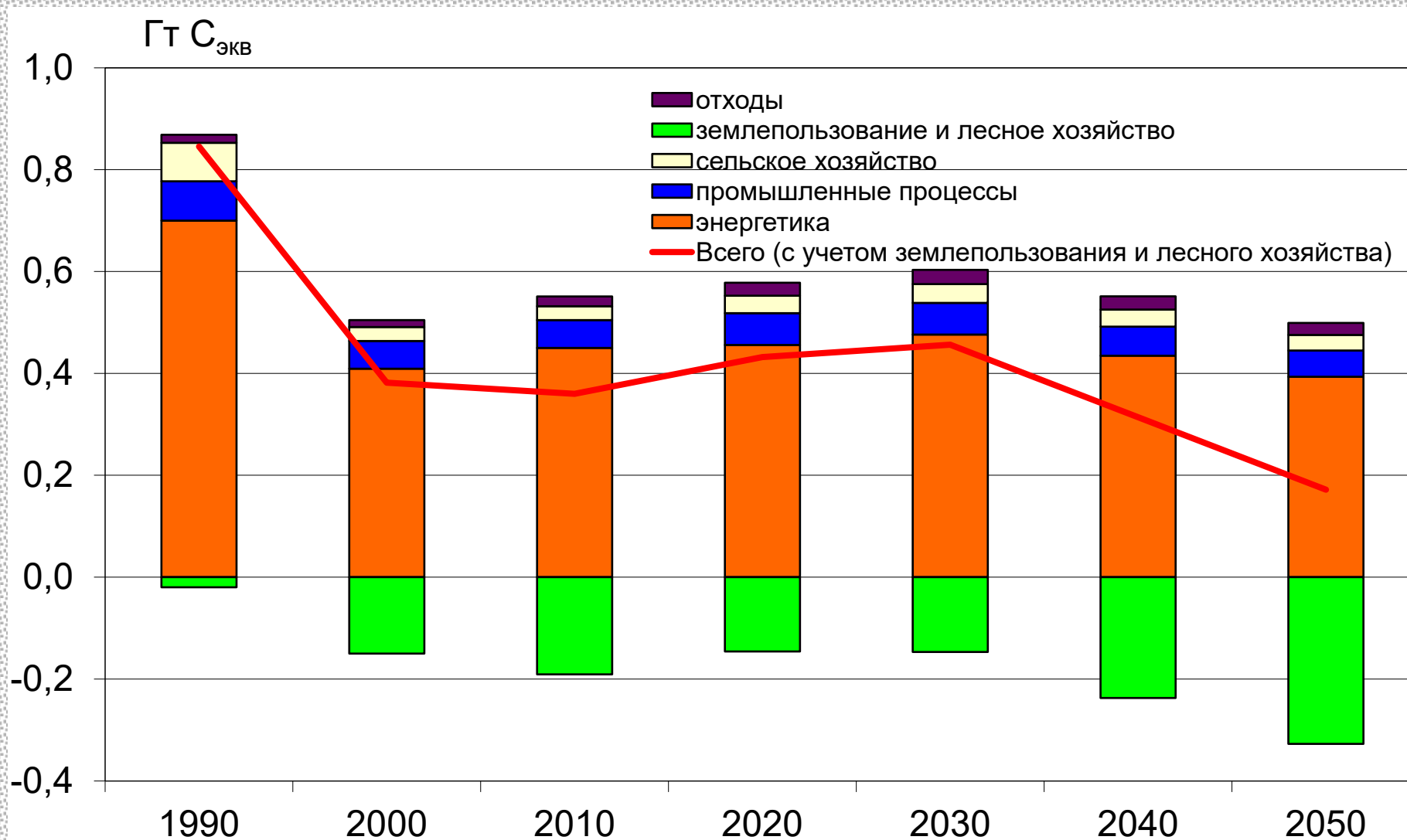
# Вклад различных мероприятий, %, в сокращение эмиссии парниковых газов к 2030 г.



– расчеты авторов по данным Falk et al., 2018

– НВИЭ – нетрадиционные и возобновляемые источники энергии

# Целевой сценарий Стратегии низкоуглеродного развития



## Производство электроэнергии из возобновляемых источников, млрд. кВт·ч (2021)

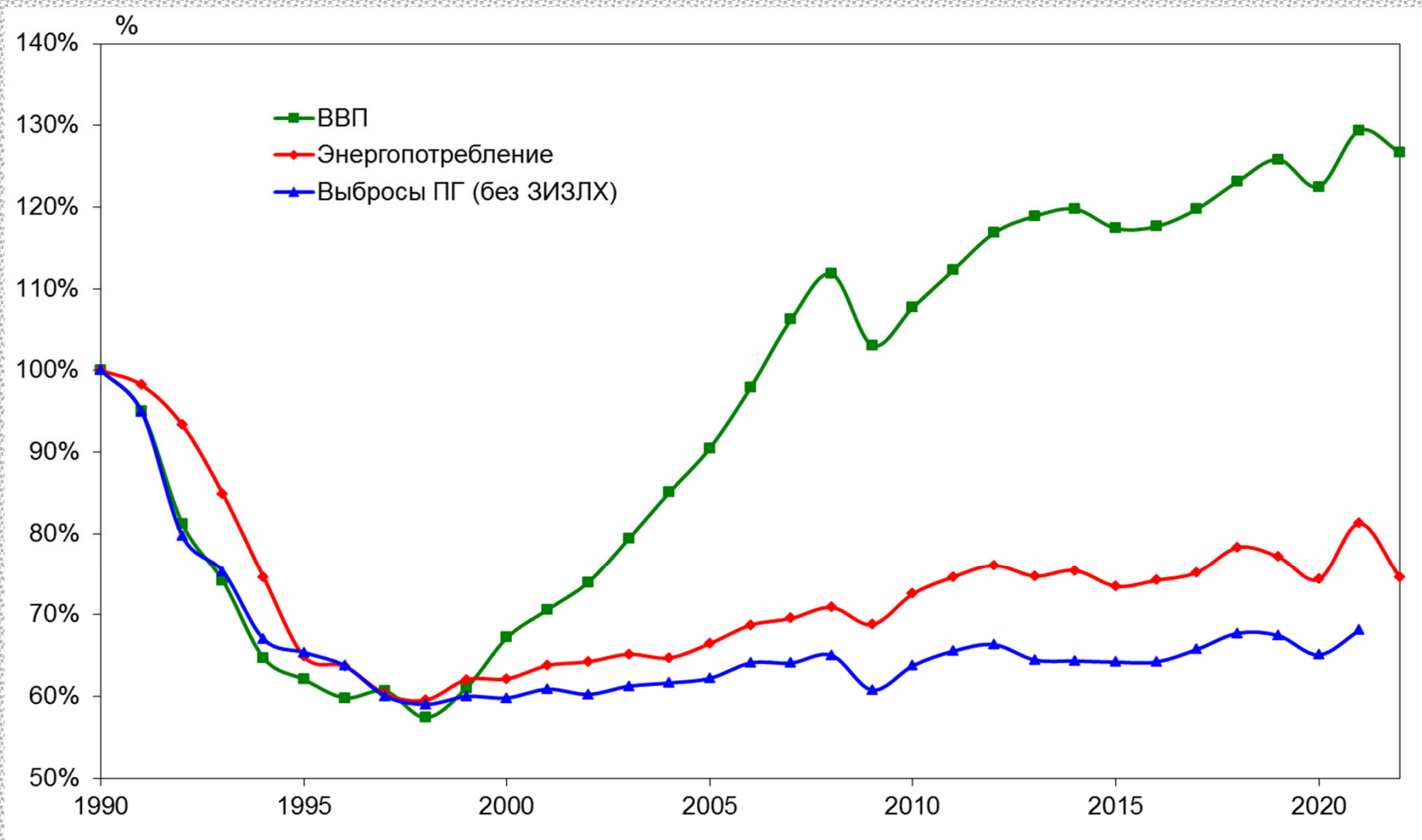
НИЛ Глобальных проблем энергетики

|    |                |      |
|----|----------------|------|
| 1  | Китай          | 1153 |
| 2  | США            | 625  |
| 3  | Германия       | 218  |
| 4  | Индия          | 172  |
| 5  | Бразилия       | 144  |
| 6  | Япония         | 130  |
| 7  | Великобритания | 117  |
| 8  | Испания        | 96   |
| 9  | Италия         | 71   |
| 10 | Франция        | 63   |
| 11 | Турция         | 63   |
| 12 | Австралия      | 61   |
| 13 | Канада         | 50   |

|    |             |     |
|----|-------------|-----|
| 14 | Швеция      | 42  |
| 15 | Мексика     | 40  |
| 16 | Южная Корея | 40  |
| 17 | Нидерланды  | 40  |
| 18 | Индонезия   | 32  |
| 19 | Чили        | 29  |
| 20 | Вьетнам     | 28  |
|    | ...         | ... |
| 45 | Уругвай     | 5,7 |
| 46 | Пакистан    | 5,7 |
| 47 | Россия      | 5,4 |
| 48 | ОАЭ         | 5,2 |
| 49 |             |     |

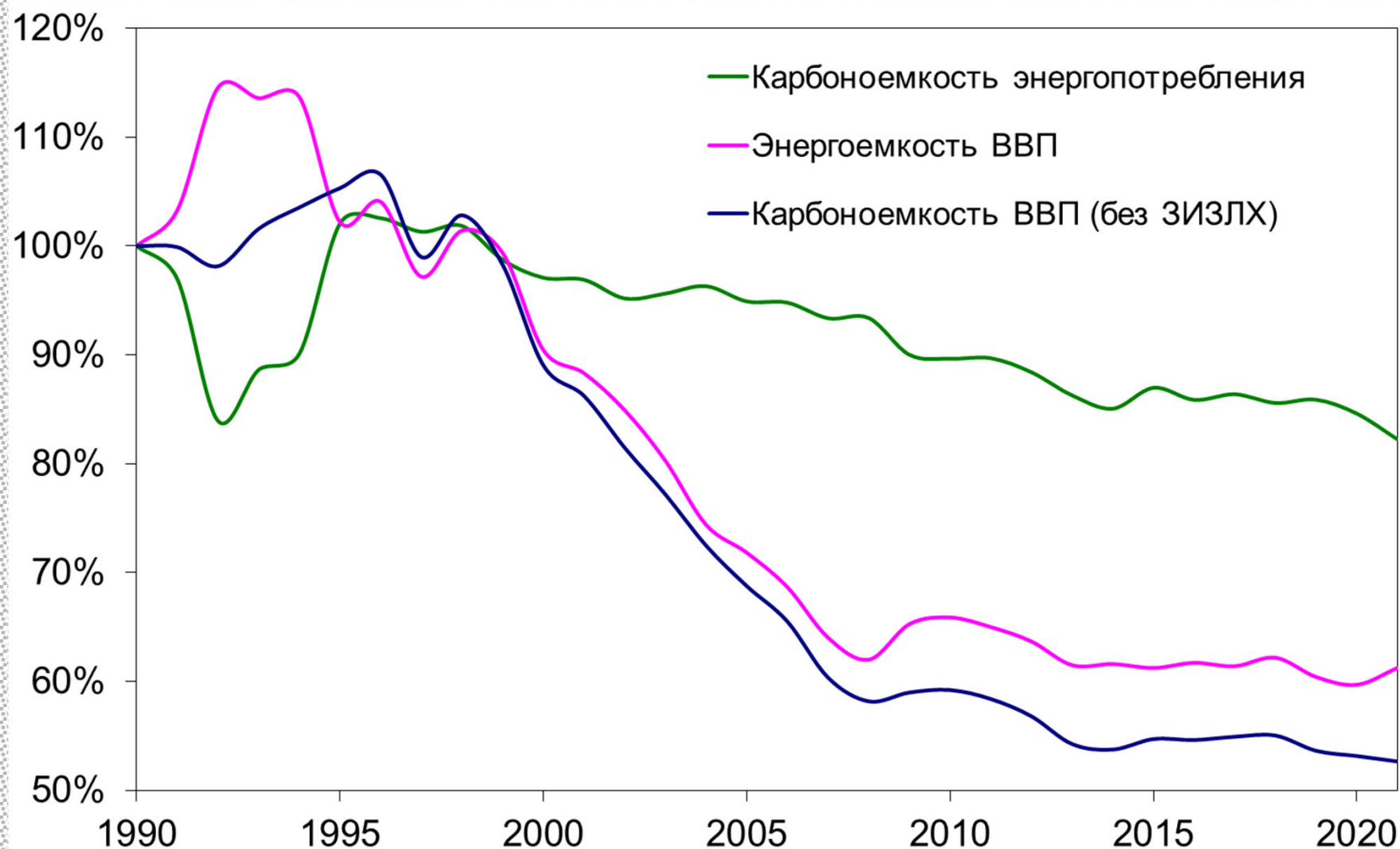
В России к 2035 г. в рамках Энергетической стратегии 18-29 млн. кВт·ч

# Энергопотребление, физический объём ВВП и выбросы парниковых газов в России (относительно уровня 1990 г.)



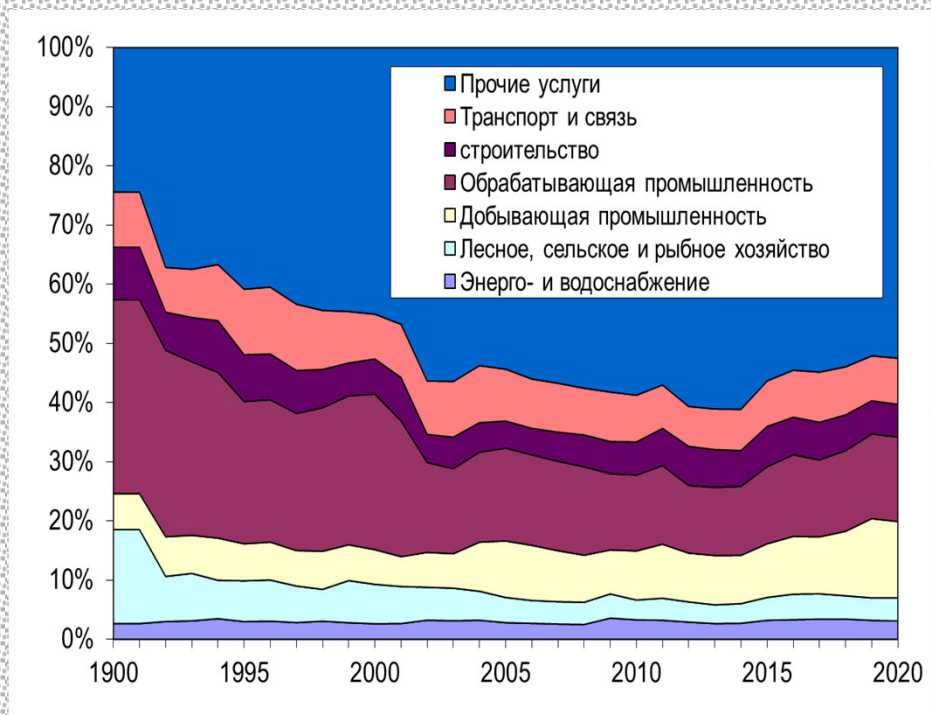
Источник данных: Росстат, Росгидромет

# Энергоемкость ВВП, карбоноемкость энергопотребления и ВВП (относительно уровня 1990 г.)

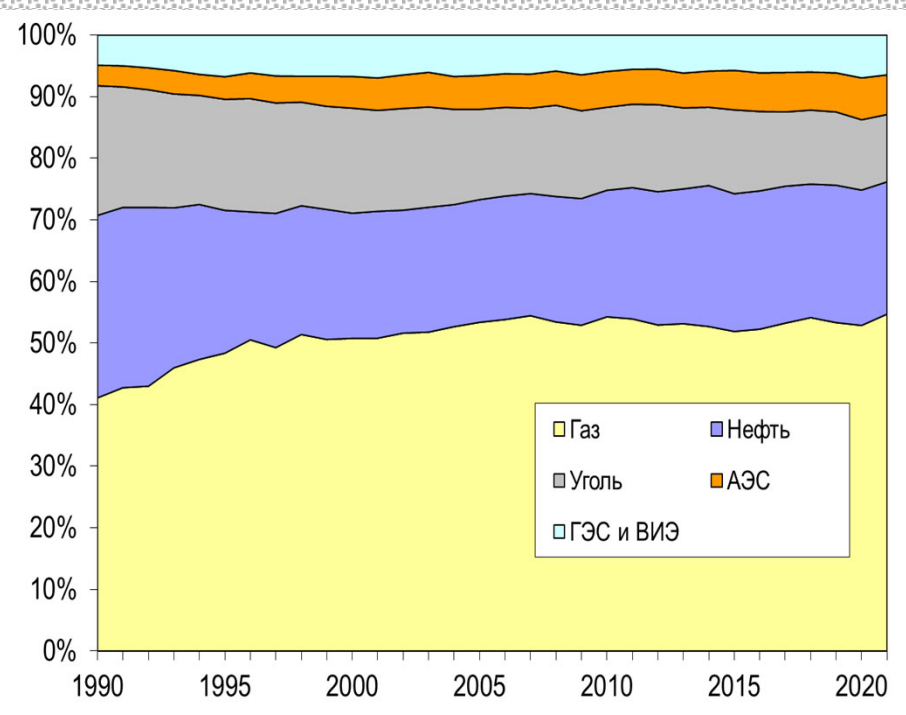


Источник данных: Росстат, Росгидромет

## Структура ВВП по отраслям (а) и энергопотребления по источникам (б) в России

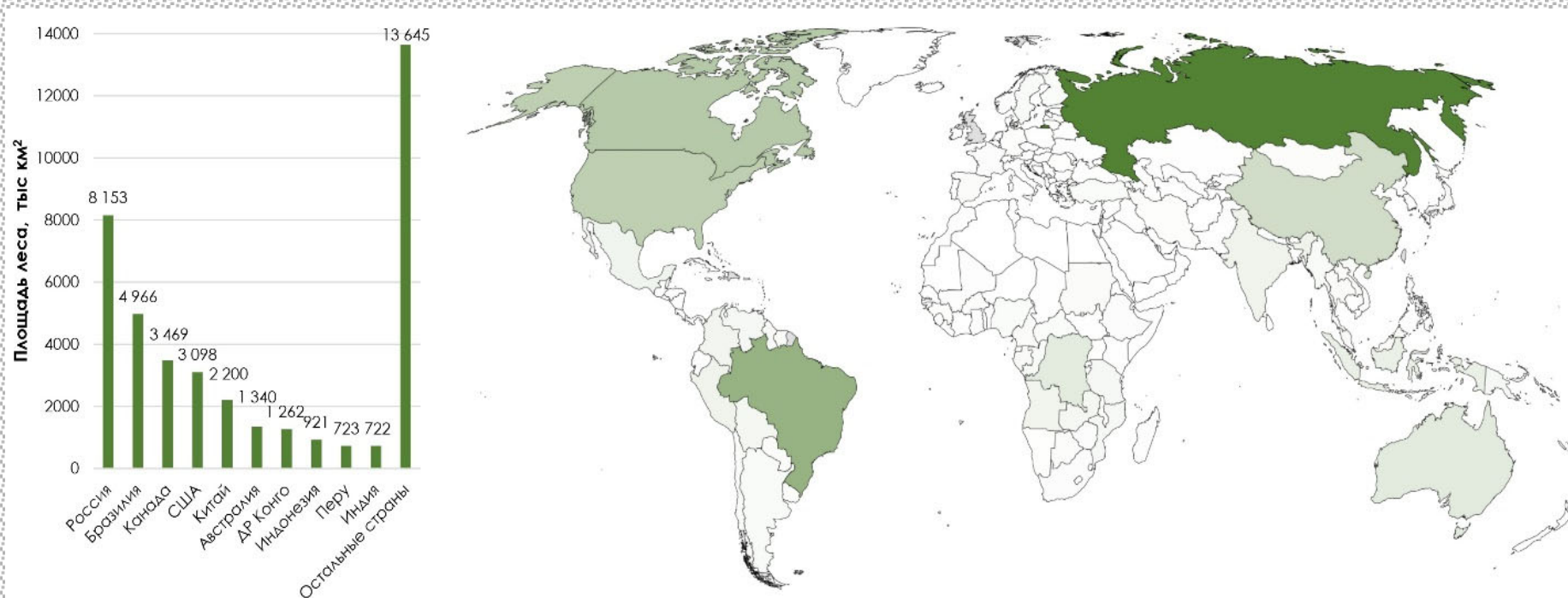


а



б

# Распределение стран с наибольшей площадью лесов, тыс. км<sup>2</sup>



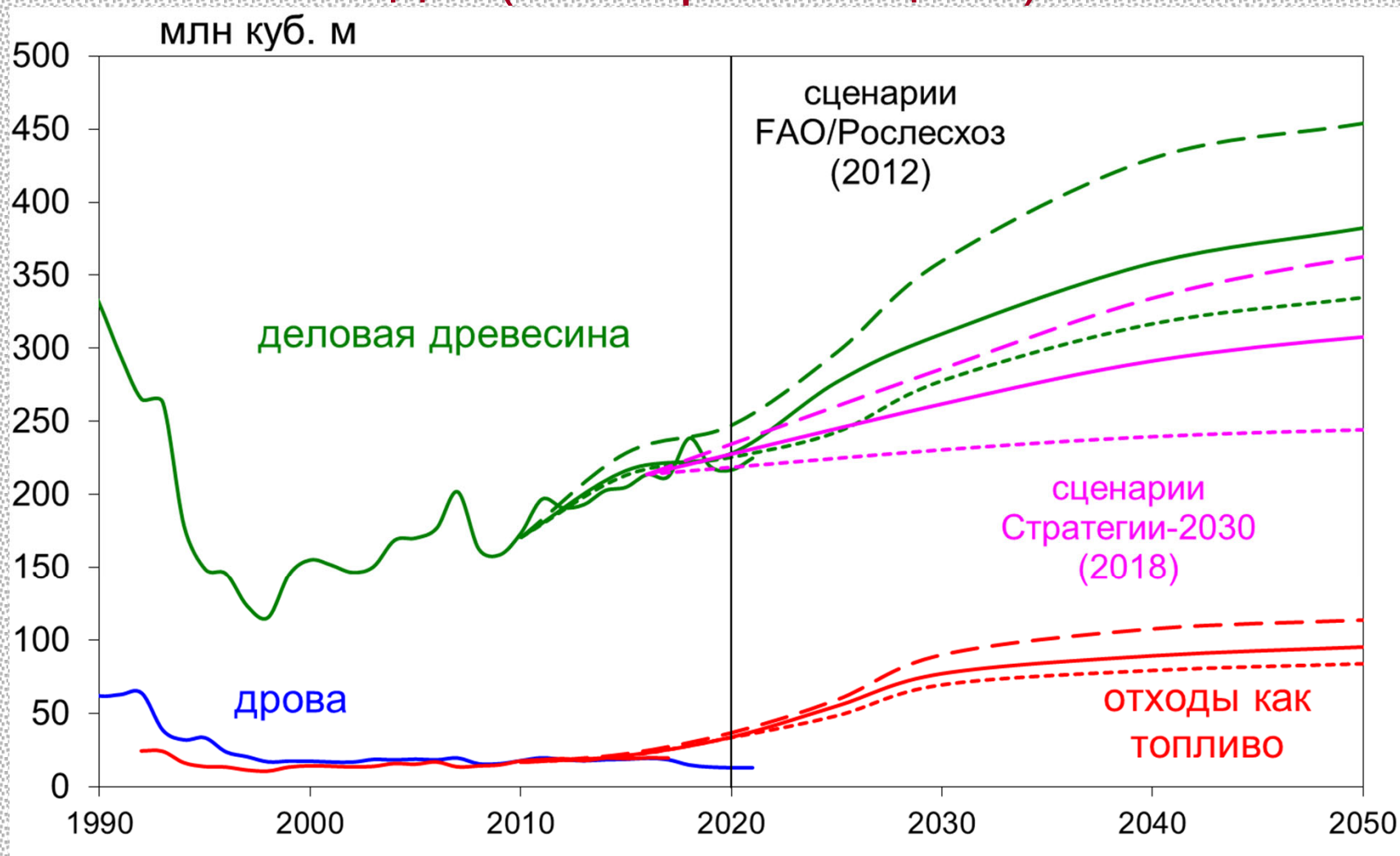
## Сводные данные нетто-стока ПГ для российского сектора ЗИЗЛХ

| Метод                                                                           | Нетто-сток, млрд т CO <sub>2</sub> год <sup>-1</sup>  |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| МГЭИК (метод конверсионных коэффициентов) +<br>данные ГЛР / ГИЛ + ДЗЗ           | <b>1,69±0,43</b> ( <i>Pan et al., 2011</i> )          |
|                                                                                 | <b>1,80</b> ( <i>Harris et al., 2021</i> )            |
| Инверсное моделирование                                                         | <b>2,39</b> ( <i>Sitch et al., 2015</i> )             |
|                                                                                 | <b>2,20-2,56</b> ( <i>Ciais et al., 2010</i> )        |
| Методика ВНИИ лесоводства и механизации<br>лесного хозяйства + данные ГЛР / ГИЛ | <b>1,47-2,39</b> ( <i>Филипчук и др., 2016</i> )      |
| CBM-CFS3 + ГЛР                                                                  | <b>0,69</b> ( <i>Замолодчиков и др., 2013</i> )       |
|                                                                                 | <b>0,95</b> ( <i>Замолодчиков и др., 2014</i> )       |
| РОБУЛ + ГЛР / ГИЛ                                                               | <b>0,76±0,22</b> ( <i>Замолодчиков и др., 2017</i> )  |
|                                                                                 | <b>0,63±0,19</b> ( <i>Замолодчиков и др., 2014</i> )  |
| IIASA: комплексный метод инвентаризации +<br>наземные данные                    | <b>2,0±0,44</b> ( <i>Швиденко и Щепашенко, 2014</i> ) |
|                                                                                 | <b>2,54±0,64</b> ( <i>Dolman et al., 2012</i> )       |
| DGVM-моделирование                                                              | <b>0,73</b> ( <i>Dolman et al., 2012</i> )            |
|                                                                                 | <b>0,72</b> ( <i>Sitch et al., 2015</i> )             |
| РОБУЛ (ГИЛ + ДЗЗ) + DGVM + IIASA                                                | <b>1,3-1,49</b> ( <i>Schepaschenko et al., 2021</i> ) |

ГЛР – Государственный лесной реестр  
 ГИЛ – Государственная инвентаризация лесов  
 IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis

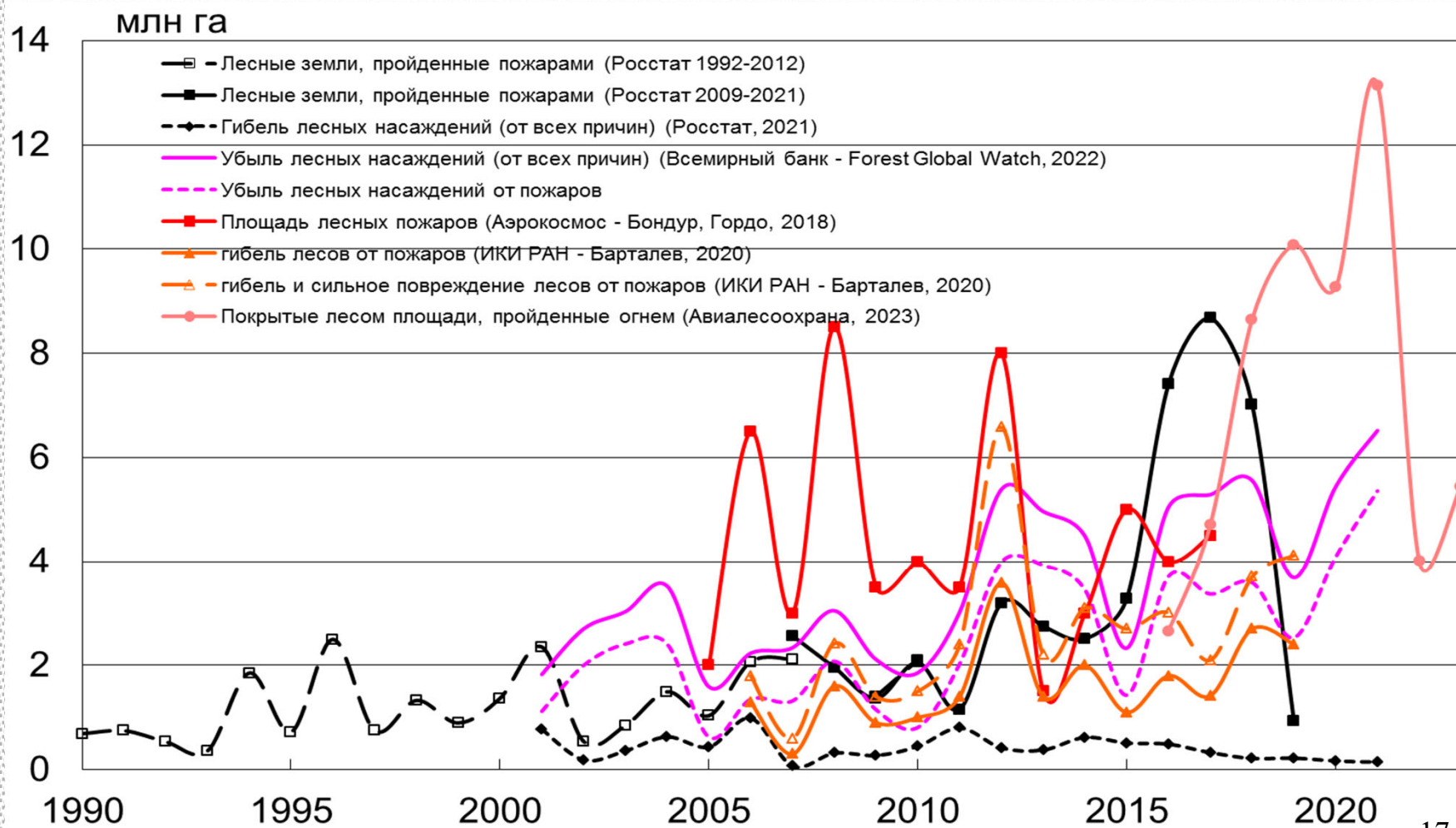
CBM-CFS3 – Carbon Budget Model of the Canadian  
 Forest Sector  
 DGVM – Dynamic Global Vegetation Model

# Прогноз развития лесного сектора РФ до 2050 года (с экстраполяцией)

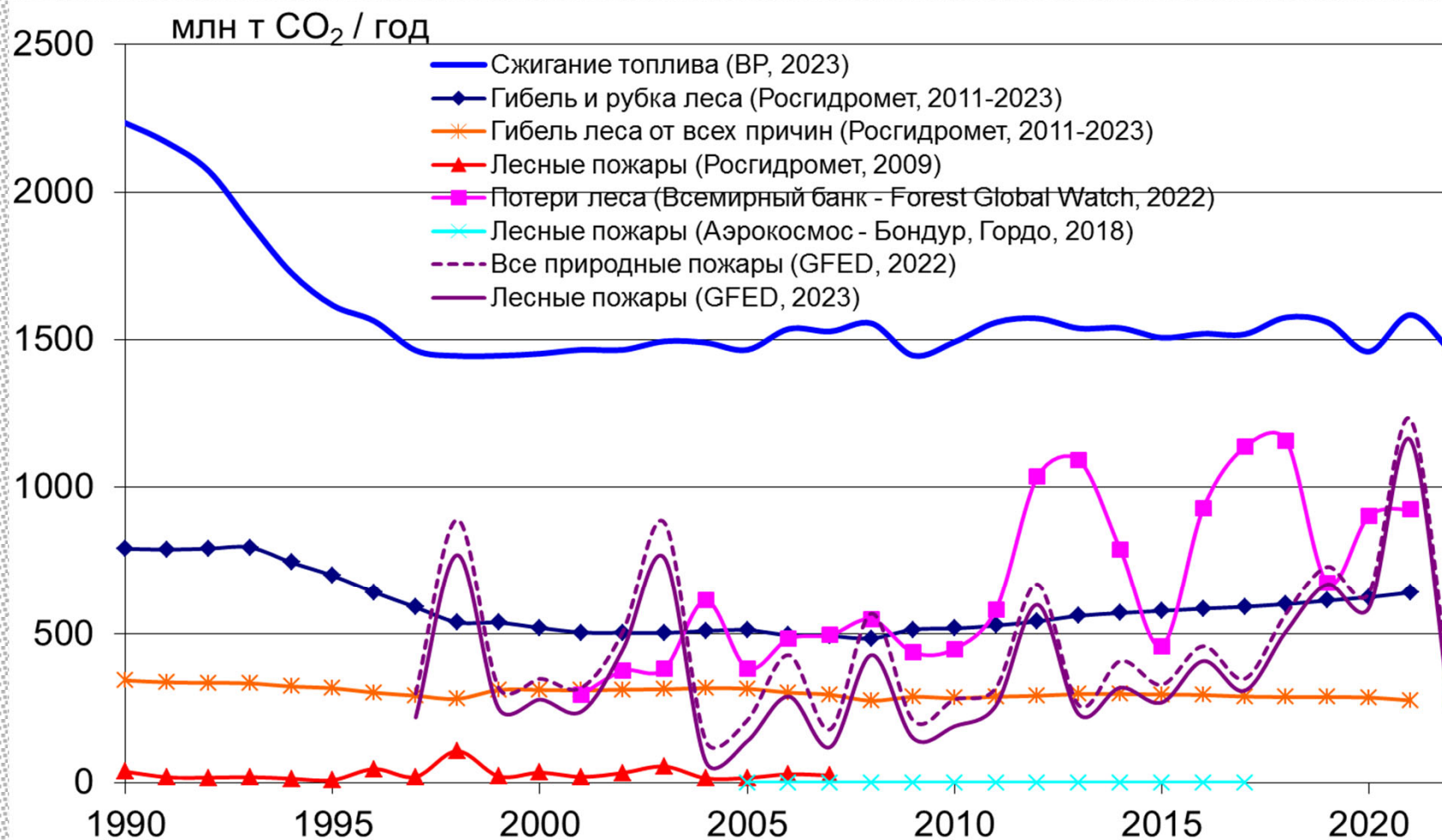


# Лесные площади, пройденные огнем и гибель лесов от пожаров в России

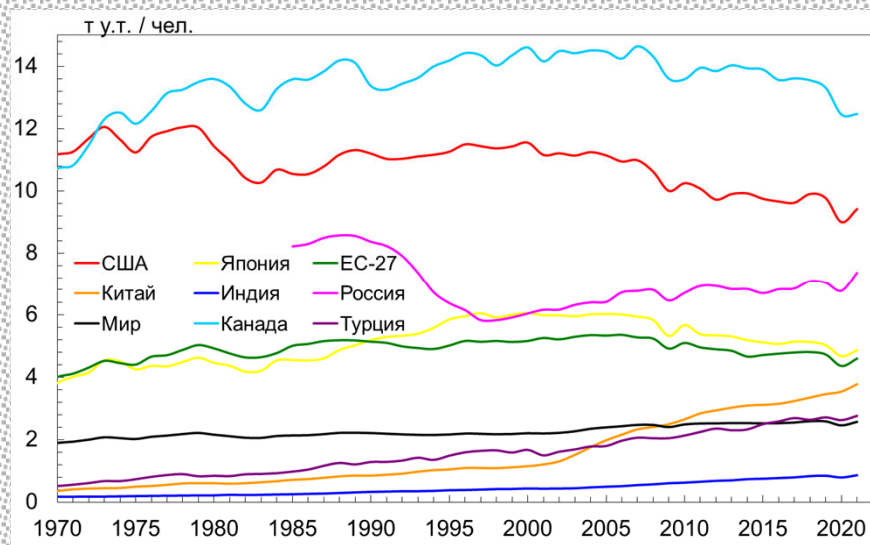
по данным Аэрокосмоса, 2017-2020 гг.; Авиалесоохраны, GFED; и Global Forest Watch



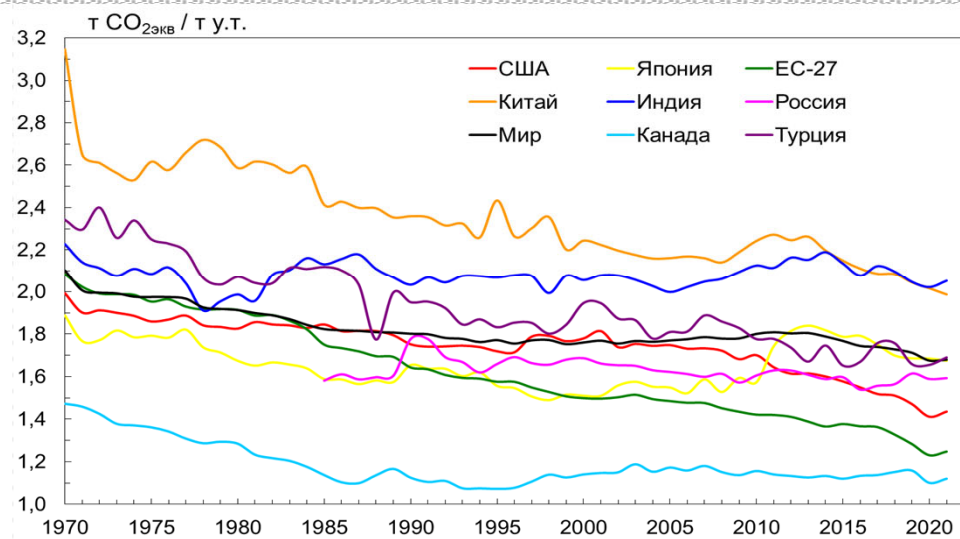
# Выбросы углекислого газа от потерь лесов в сравнении с эмиссией при сжигании топлива в России



# Удельное энергопотребление (а) и углеродная интенсивность энергопотребления (б)



а

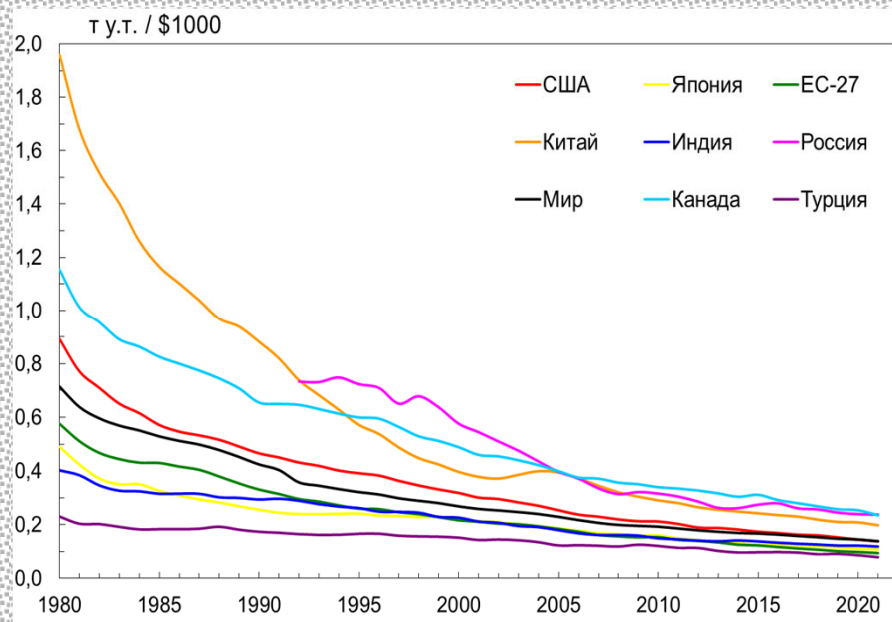


б

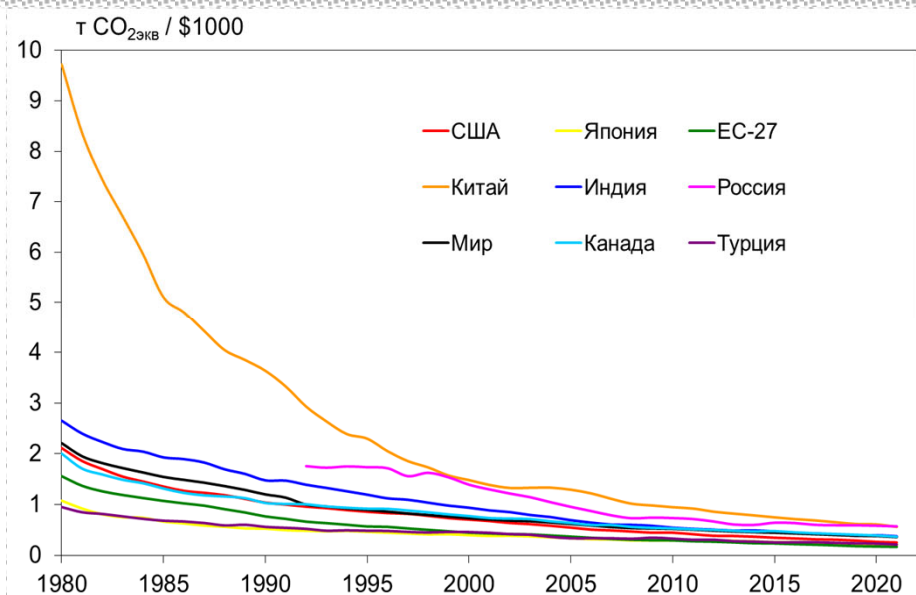
Источники данных: BP Statistical Review of World Energy, 2023;  
UN World Population Prospects, 2022 и EDGAR, 2023

# Энергоемкость (а) и углеродоемкость (без ЗИЗЛХ) (б) ВВП по ППС

по данным BP Statistical Review of World Energy, 2022; EDGAR и МВФ



а

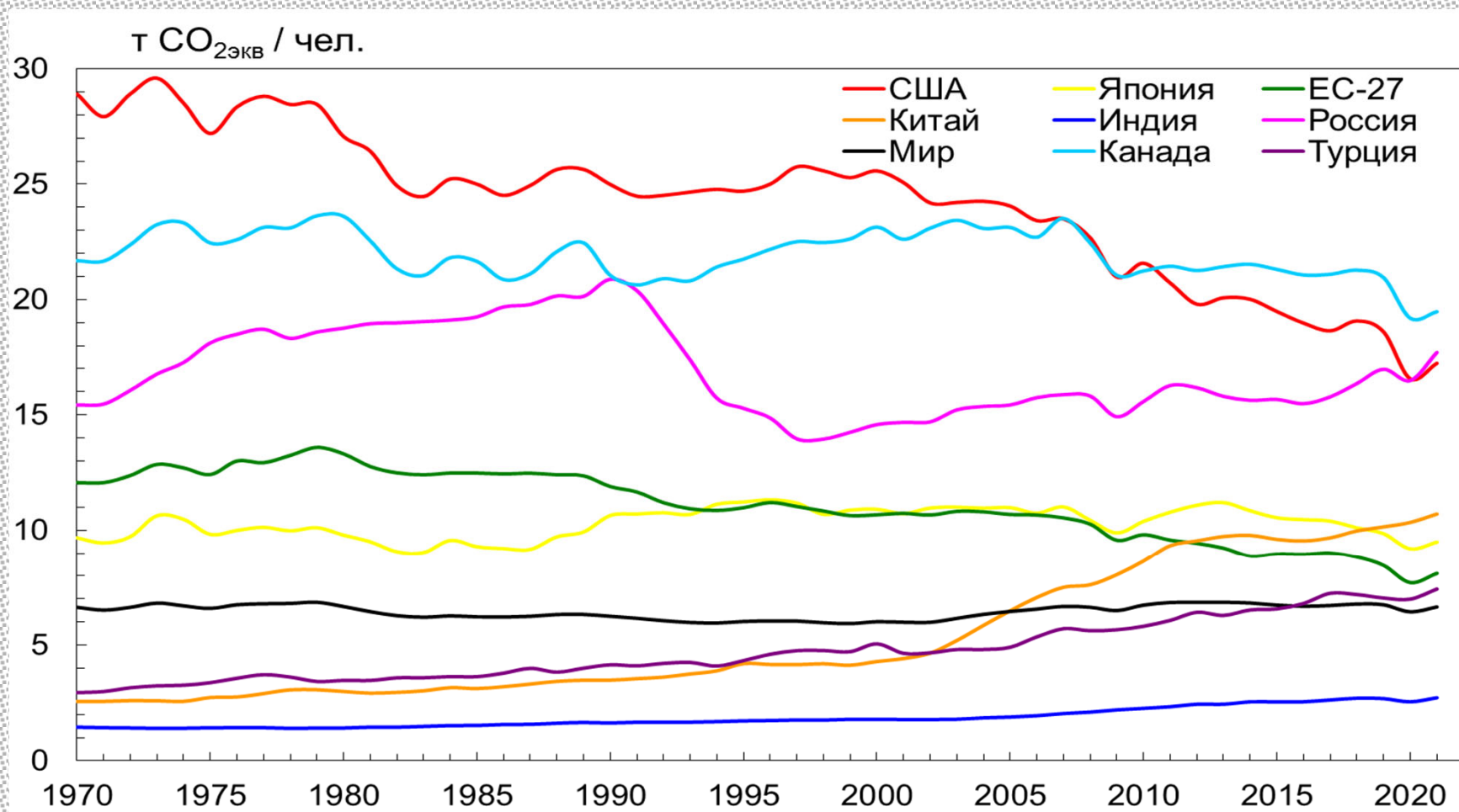


б

Источники данных: BP Statistical Review of World Energy, 2023;  
МВФ, 2022 и EDGAR, 2023

# Удельные выбросы ПГ на душу населения (без ЗИЗЛХ)

по данным EDGAR и World Population Prospects, 2022

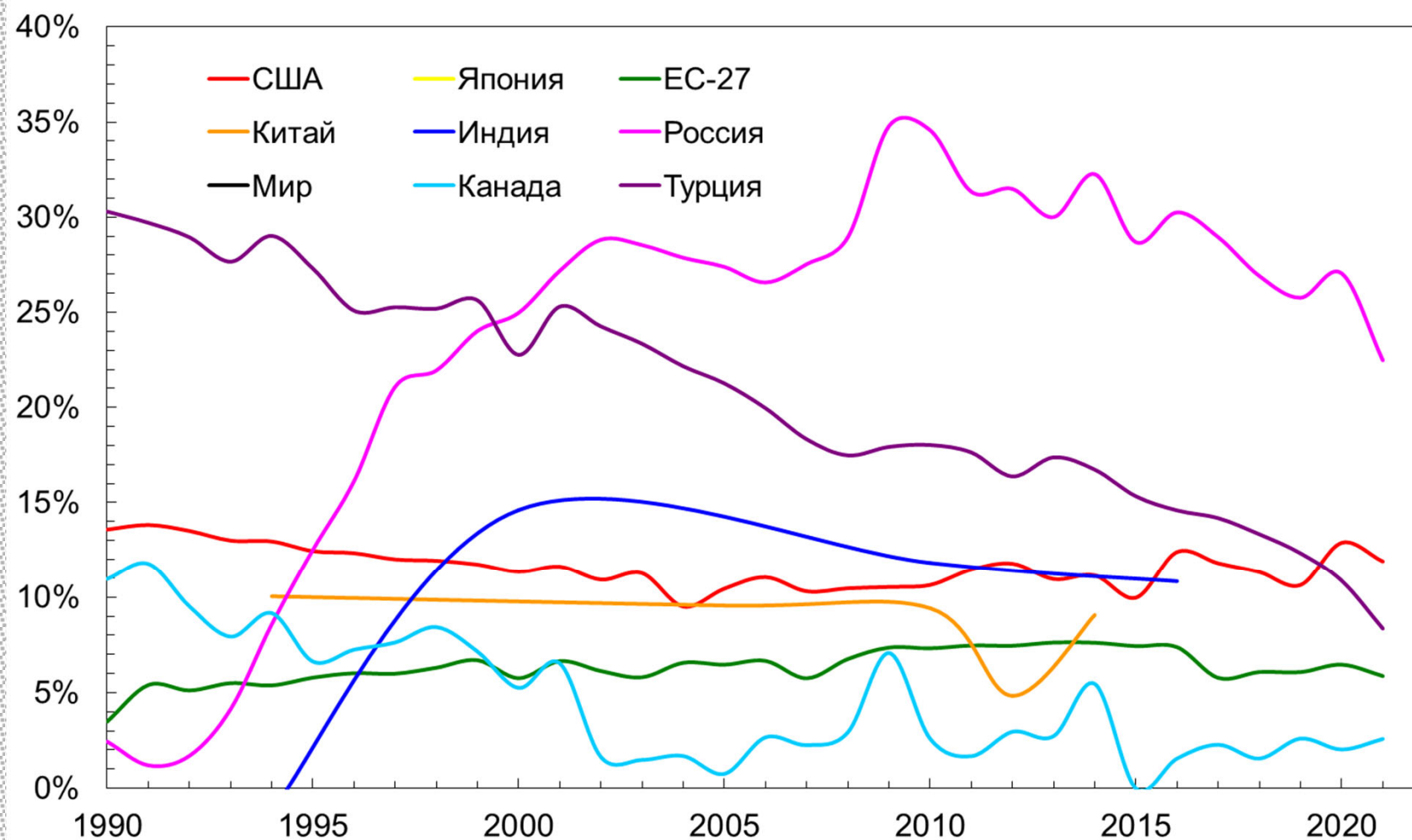


Источники данных: UN World Population Prospects, 2022 и EDGAR, 2023

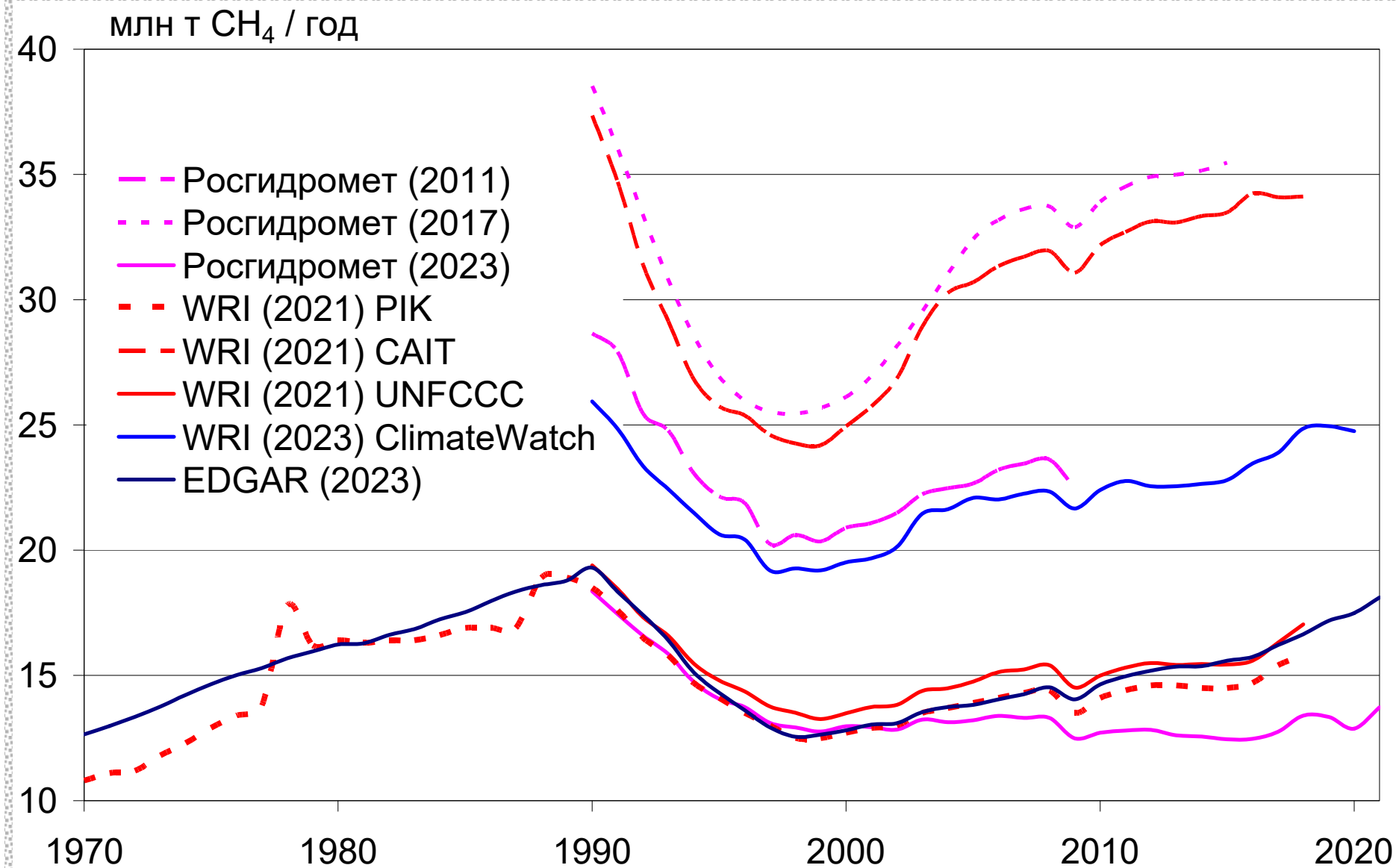
## Темпы изменения удельных выбросов ПГ (% в год)

|                                                                            | США  | Канада | Япония | ЕС-27 | Россия | Турция | Китай | Индия |
|----------------------------------------------------------------------------|------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| <b>Углеродоемкость ВВП (т CO<sub>2</sub><sub>экв.</sub>/\$1000)</b>        |      |        |        |       |        |        |       |       |
| 1980-2020                                                                  | -5.0 | -4.0   | -3.9   | -5.3  |        | -3.5   | -6.7  | -4.6  |
| 1990-2020                                                                  | -4.3 | -3.5   | -2.8   | -5.0  | -3.8   | -3.2   | -5.8  | -4.3  |
| 2000-2020                                                                  | -4.5 | -3.9   | -3.0   | -4.9  | -4.4   | -3.6   | -4.3  | -4.2  |
| 2010-2020                                                                  | -4.7 | -3.6   | -2.8   | -5.5  | -2.8   | -4.1   | -4.3  | -3.2  |
| <b>Выбросы ПГ на душу населения (т CO<sub>2</sub><sub>экв.</sub>/чел.)</b> |      |        |        |       |        |        |       |       |
| 1970-2020                                                                  | -1.1 | -0.2   | -0.1   | -0.9  | 0.1    | 1.7    | 2.8   | 1.1   |
| 1980-2020                                                                  | -1.2 | -0.5   | -0.2   | -1.4  | -0.3   | 1.8    | 3.1   | 1.5   |
| 1990-2020                                                                  | -1.3 | -0.6   | -0.4   | -1.6  | -1.4   | 1.4    | 3.7   | 1.5   |
| 2000-2020                                                                  | -1.9 | -1.4   | -0.8   | -1.8  | 0.4    | 1.4    | 4.5   | 1.8   |
| 2010-2020                                                                  | -2.3 | -1.6   | -1.0   | -2.7  | 0.0    | 1.3    | 1.8   | 1.2   |

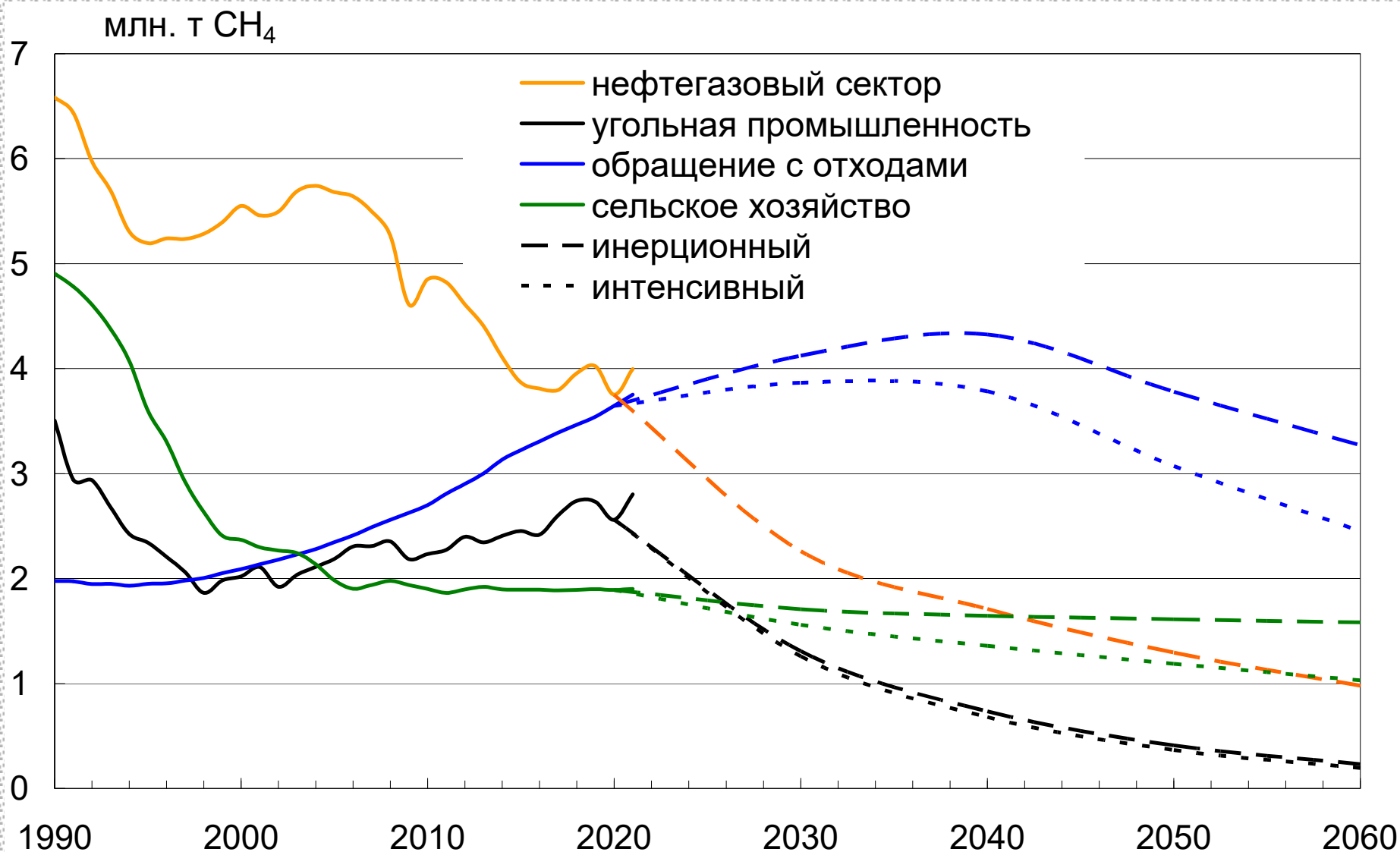
## Нетто-сток ПГ за счет ЗИЗЛХ (относительно суммарной эмиссии из остальных источников)



# Суммарные выбросы метана на территории России в 1970-2020 гг. по различным оценкам



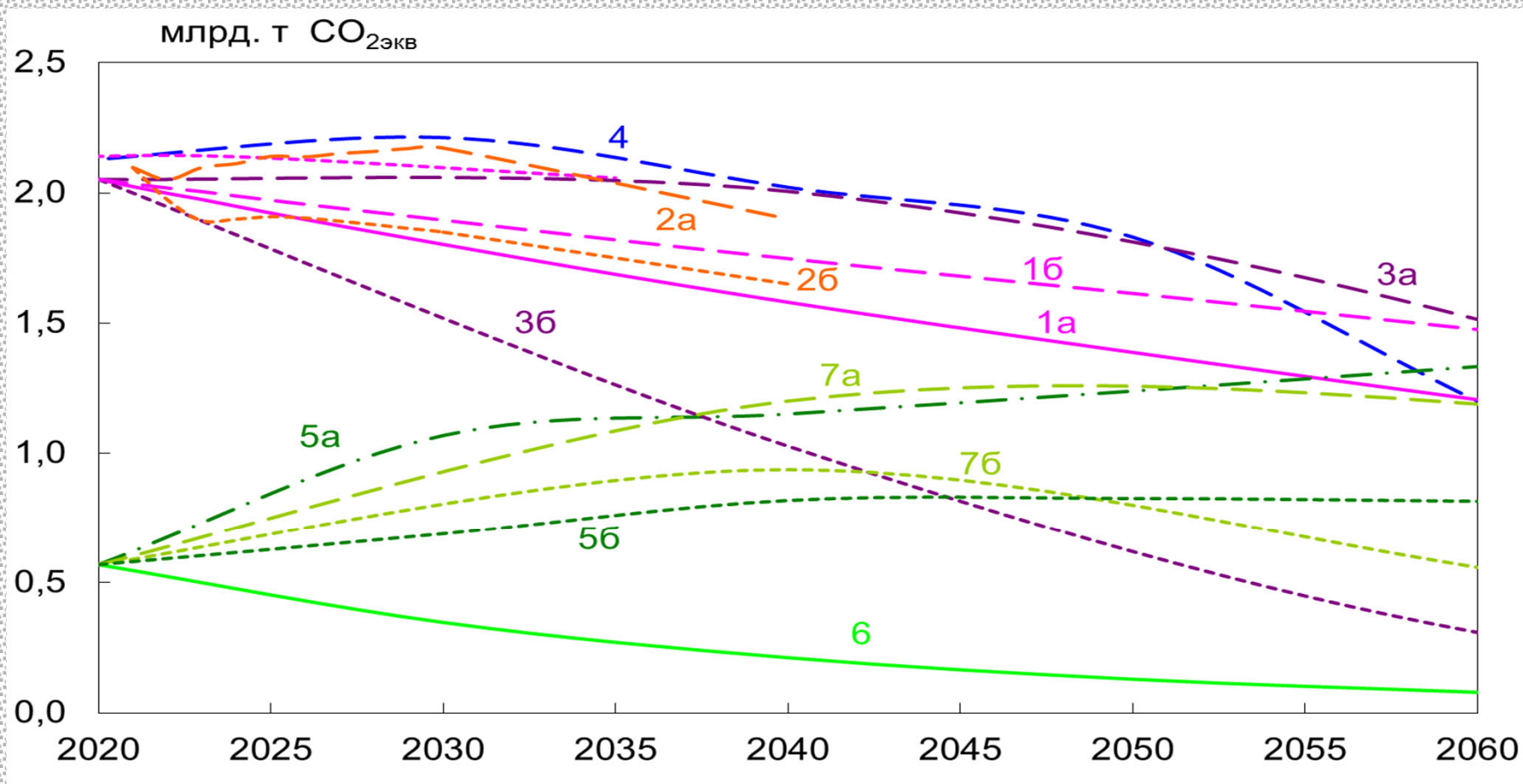
# Валовые выбросы метана из основных антропогенных источников на территории России по инерционному и интенсивному сценариям



# Сценарии выбросов ПГ в России до 2060 года

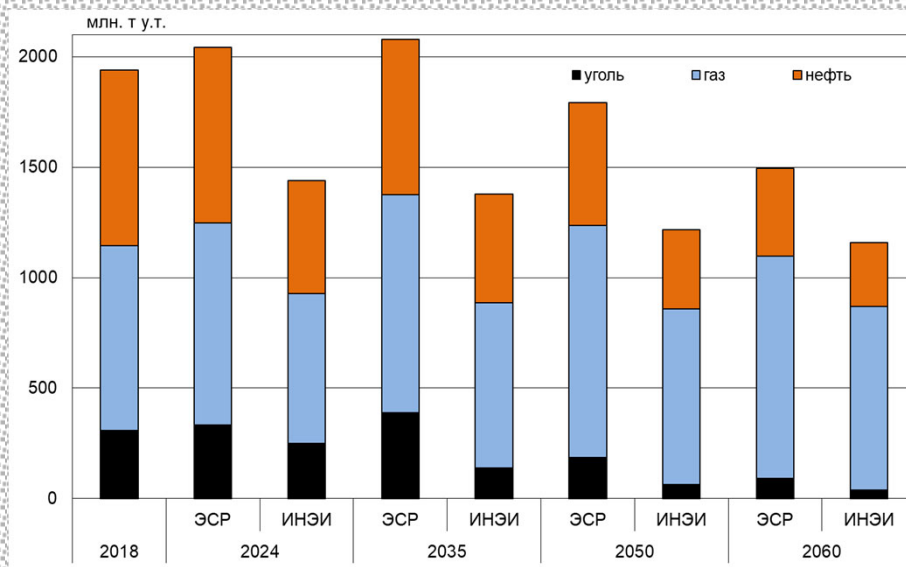
|                                                                     | Оптимистический                                                                                                                                              | Реальный                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Темпы снижения удельных антропогенных выбросов, % год <sup>-1</sup> | 1,0                                                                                                                                                          | 0,5                                                                                                                                        |
| Показатели лесопользования                                          | <p>Стратегия-2030 (2021)<br/>Полное лесовосстановление</p> <p>Динамика поглощения по международным оценкам<br/>Рост нетто-стока на 2,1% год<sup>-1</sup></p> | <p>Расчет динамики поглощения по актуальным международным рекомендациям (РОБУЛ+МГЭИК)</p> <p>Рост нетто-стока на 0,7% год<sup>-1</sup></p> |
| Борьба с лесными пожарами                                           | 50% сокращение площади пожаров к 2030 г. с дальнейшим поддержанием статус-кво                                                                                | Незначительное сокращение площади лесных пожаров                                                                                           |

# Сценарии: суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-стока ЗИЗЛХ

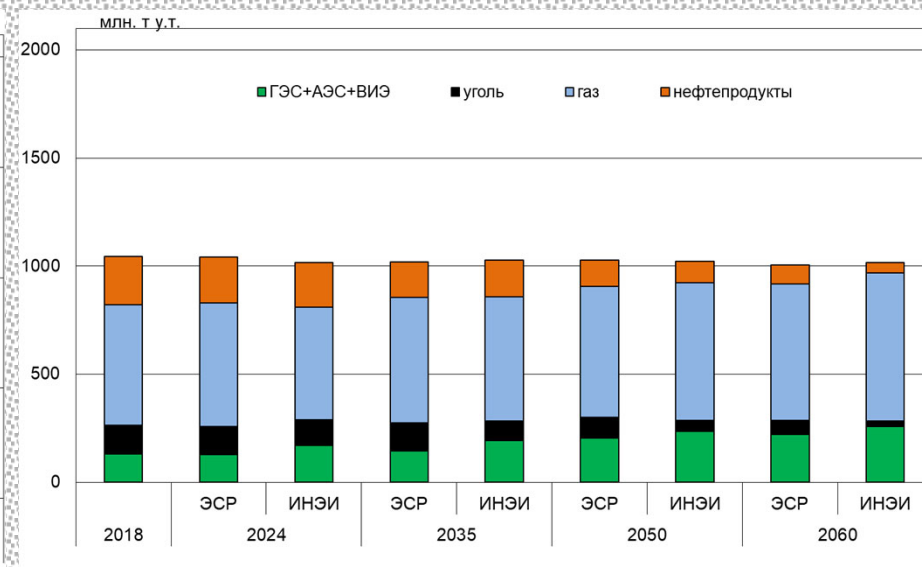


Сценарии: оптимистический (1a) и реальный (1b) настоящей работы; базовый (2a) и исходный (2b) ИНЭИ, 2022; rcp4.5 (3a) и rcp2.6 (3b) ИФА РАН, 2022; целевой (4) Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, 2021; оптимистический (5a) и реальный (5b) настоящей работы; базовый (6) Шварц и др. 2022; rcp4.5 (7a) и rcp2.6 (7b) ИФА РАН, 2022

# Оценки добычи (а) и потребления (б) энергоресурсов согласно низкому сценарию<sup>1</sup> и базовому сценарию<sup>2</sup> с экстраполяцией до 2060 г.



а

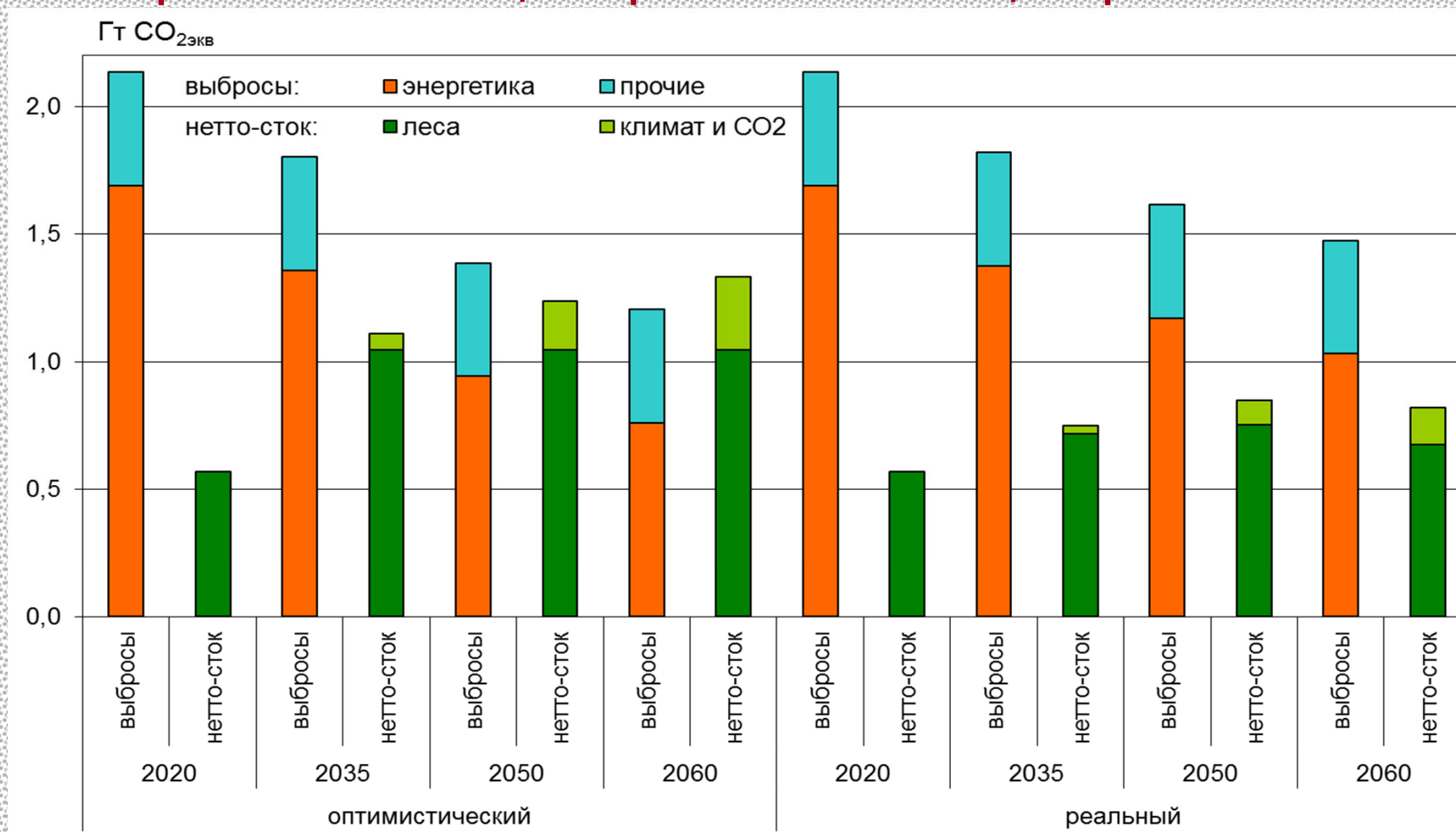


б

<sup>1</sup> – Энергетическая стратегия России (ЭСР, 2020)

<sup>2</sup> – ИНЭИ РАН (ИНЭИ, 2022)

# Оценки суммарной эмиссии ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-стока ЗИЗЛХ для оптимистического и реального сценариев настоящей работы



## Перспективы декарбонизации российской экономики по реальному сценарию

|                                                             | 2020 | 2060      |
|-------------------------------------------------------------|------|-----------|
| Антропогенные выбросы ПГ, млн. т $\text{CO}_{2\text{-экв}}$ | 2050 | 1470      |
| Нетто-поток ПГ за счет ЗИЗЛХ                                | 570  | 760 (980) |
| Небаланс ПГ                                                 | 1480 | 710 (490) |
| Мощность российской газовой промышленности, млн. т          | 500  |           |
| Мощность установок CCS в мире, млн. т                       | 42,5 |           |

# Проекты по захоронению углекислого газа в мире в 2020 г.



| Промышленные                                                                                                     | Демонстрационные                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  эксплуатируемые и строящиеся |  эксплуатируемые и проектируемые |
|  проектируемые                |                                                                                                                       |
|  приостановленные             |  завершенные                     |

# ВЫВОДЫ

1. Падение добычи, потребления и экспорта энергоносителей, связанное с ограничениями геополитического характера, значительно ускоряет процесс декарбонизации, но само по себе не обеспечивает достижение климатической нейтральности.
2. Необходимыми, но недостаточными условиями для достижения углеродной нейтральности являются многолетнее снижение удельных (на душу населения) антропогенных выбросов ПГ со скоростью 1% в год, полная компенсация лесных вырубок за счет лесовосстановления с одновременным сокращением площадей лесных пожаров не менее чем на 50%.
3. Для покрытия перспективного небаланса необходимо либо удвоение (по сравнению с современным значением) нетто-стока в ЗИЗЛХ, что выглядит сомнительным, либо развитие технологий CCS в масштабах, которые превосходят современные глобальные мощности примерно в 15 раз.
4. С точки зрения мирового исторического опыта противостояния глобальному потеплению достижение углеродной нейтральности экономики России к 2060 г. вряд ли возможно.

**Спасибо за внимание!**