

Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности

И.А. Башмаков

Центр энергоэффективности – XXI век,
Россия, 117418, Москва, а/я 28, ул. Новочеремушкинская, 61

*адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

Реферат. Данная статья посвящена анализу масштабов и динамики выбросов парниковых газов глобальной промышленностью. В ней показано, что мировая промышленность доминирует в прямых и косвенных выбросах парниковых газов (ПГ) – почти 18 Гт CO₂экв., или 30% всех антропогенных выбросов, и что это доминирование сохранится в перспективе. Основная доля выбросов в промышленности приходится на базовые материалы – около 11 Гт CO₂экв., а с учетом их транспорта – около 12 Гт CO₂экв. Рост выбросов ПГ от промышленности в последние 10 лет замедлился, но не остановился. Особенно динамично росли выбросы в цветной металлургии и химической промышленности. В последние 15-25 лет удельные выбросы ПГ при производстве многих базовых материалов стагнировали. Решение задачи декарбонизации глобальной промышленности требует в ближайшие 30-50 лет динамичного снижения удельных выбросов в масштабах, которые уже были продемонстрированы в прошлом. Это возможно, но потребует динамичной и затратной модернизации глобальной промышленности на основе технологий, которые уже появились, но многие из которых еще не вышли на рынок.

Ключевые слова. Парниковые газы, промышленность, базовые материалы, декарбонизация.

The scale of action required to decarbonize global industry

I.A. Bashmakov

Center for Energy Efficiency – XXI (CENEf-XXI),
61, Novocheremushkinskaya str., 117418, Moscow, Russian Federation

*correspondence address: *bashmako@co.ru*

Abstract. This article is devoted to the analysis of the scale and evolution of greenhouse gas emissions from the global industry. It shows that the global industry dominates in direct and indirect GHG emissions – almost 18 Gt CO₂, or 30% of all anthropogenic emissions – and that this dominance will persist. Basic materials are responsible for the larger part of industrial emissions – about 11 Gt CO₂eq. (or

about 12 Gt CO₂eq. if transport is included). The growth in GHG emissions from the industrial sector has slowed down in the last 10 years, but has not stopped. Emissions in the iron and steel and chemical industry have shown a particularly dynamic growth. In the last 15-25 years, specific GHG emissions from the production of many basic materials have stagnated. Decarbonization of the global industry requires a dynamic reduction in specific emissions over the next 30-50 years on a scale that has already been demonstrated in the past. This is feasible, but will require a profound and costly modernization of the global industry based on technologies that are already in place, but many of which have not entered the market so far.

Keywords. Greenhouse gases, industry, basic materials, decarbonization.

Роль промышленности в структуре прямых и косвенных выбросов ПГ

Рост глобальных выбросов ПГ пока остановить не удалось. С 1750 г. глобальные выбросы ПГ выросли в 25 раз до 59 ГтСО₂экв. (Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021). Сначала главным источником выбросов было сельское хозяйство, а главным фактором снижения объемов стоков ПГ стало изменение в землепользовании (сведение лесов для нужд сельского хозяйства, отопления и строительства). Только к 1950 г. на первый план вышли выбросы ПГ от добычи и сжигания ископаемого топлива и от промышленных процессов. Их динамичный рост в 6 раз с 1950 г. повлек за собой рост суммарных выбросов в 3.4 раза.

В XXI веке продолжался рост выбросов ПГ во всех секторах глобальной экономики (рис. 1). Прямые выбросы наиболее динамично росли в промышленности и в энергетике и более медленно – в зданиях (рис. 1). В последние 50 лет промышленность занимала второе-третье место в списке источников прямых выбросов ПГ, которые к 2019 г. достигли почти 12 ГтСО₂экв, или 20% всех антропогенных выбросов. После временного снижения в 80-х и 90-х годах вклад промышленности вернулся на уровень 1970-1980 гг. По темпам роста в 2010-2019 гг. промышленность уступала только секторам СХЛХДВЗ (сельское и лесное хозяйство и другие виды землепользования, AFOLU) и Отходам¹⁾.

Роль секторов в суммарных выбросах ПГ заметно меняется при учете косвенных выбросов ПГ в процессах производства электрической и тепловой энергии, потребляемой в этих секторах. Уровень электрификации существенно выше в промышленности и в зданиях. Поэтому самая большая доля косвенных выбросов приходится на здания и промышленность (рис. 2). Для остальных секторов вклад косвенных выбросов ограничен. Рост электрификации при условии высокой углеродоемкости электроэнергии приводит к ускоренному росту выбросов ПГ, что наглядно показал опыт Китая и Индии.

¹⁾ В отличие от оценочных докладов МГЭИК и базы данных EDGAR (2021), EDGARv6 release (Minx et al., 2021), в данной работе выбросы от сектора «Отходы» не включаются в выбросы ПГ от промышленности.

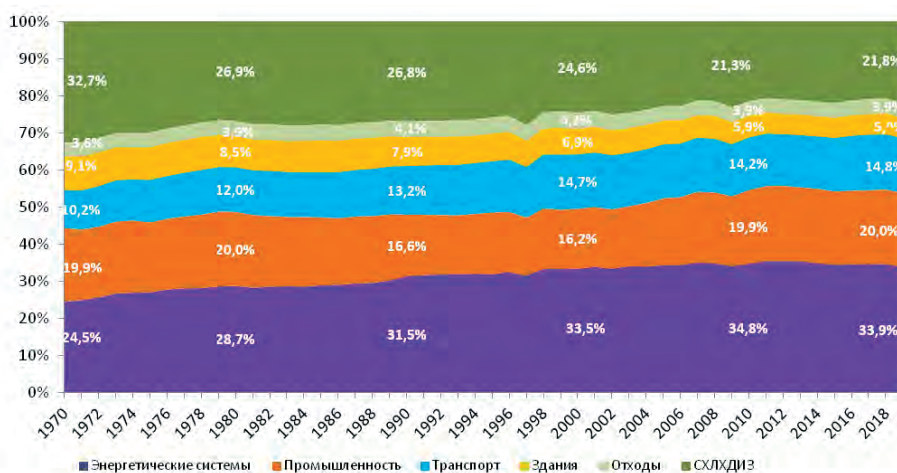
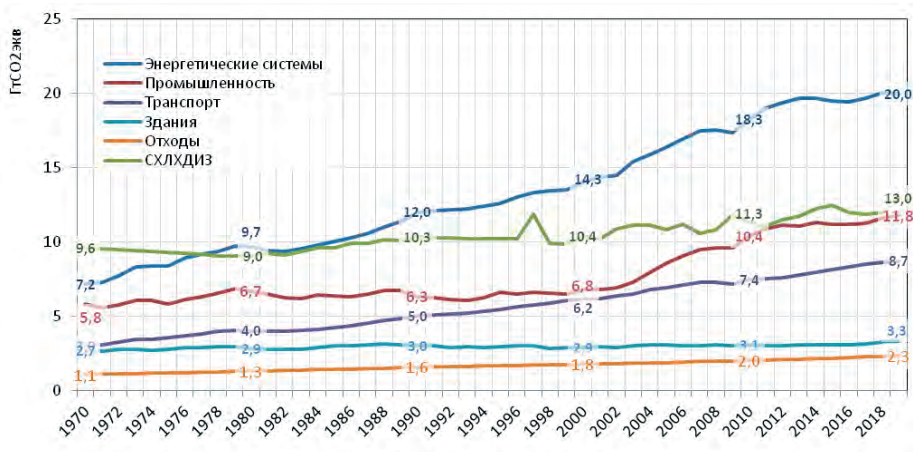


Рисунок 1. Динамика и структура антропогенных выбросов ПГ по секторам глобальной экономики*

Figure 1. Dynamics and structure of anthropogenic GHG emissions by sectors of the global economy*

* В табличной вставке показаны среднегодовые темпы роста.

Источники: автор по данным EDGARv6 2021 release (Minx et al., 2021 и Lamb et al., 2021)

С учетом косвенных выбросов в структуре глобальных выбросов ПГ со значительным отрывом лидирует промышленность. На нее в 2019 г. пришлось 17.7 Гт CO₂экв, или 30% выбросов (рис. 2). За промышленностью следуют СХЛХДВЗ с 13.4 Гт CO₂экв. (22%); здания – 9.7 Гт CO₂экв. (17%), транспорт – 8.9 Гт CO₂экв. (15%), энергетический сектор (добыча и переработка топлива) – 6.8 Гт CO₂экв. (11%), и замыкают список отходы – 2.3 Гт CO₂экв. (4%).



Рисунок 2. Структура прямых и косвенных антропогенных выбросов ПГ по основным секторам в 2019 г.

Figure 2. Structure of direct and indirect anthropogenic GHG emissions by key sectors in 2019

Источники: автор с использованием данных рис. 1.

По мере декарбонизации мировой экономики будут параллельно идти два процесса: декарбонизация электроэнергетики и рост отношения воплощенных в продуктах, оборудовании, зданиях и сооружениях выбросов по сравнению с выбросами от их эксплуатации. Эти процессы будут отражаться в росте доли промышленности в текущих как прямых, так и косвенных выбросах ПГ при одновременном росте требований к ускоренной декарбонизации производства базовых материалов.

Вклад основных факторов в формирование траекторий выбросов ПГ в секторах

Анализ вклада факторов в формирование траекторий динамики выбросов ПГ начался с выбросов от сжигания топлива с выявлением вклада факторов, которые определяют динамику выбросов ПГ, с использованием тождества Кайя (Кая):

$$CO_2 = POP * \frac{GDP}{POP} * \frac{E}{GDP} * \frac{CO_2}{E}, \quad (1)$$

где CO_2 – антропогенные выбросы CO_2 ; POP – численность населения, GDP – глобальный ВВП, E – потребление первичной энергии. Вместо CO_2 в этом тождестве могут использоваться все ПГ (GHG) от сжигания, добычи, транспортировки и распределения топлива. Тогда темп роста выбросов ПГ является суммой темпов роста четырех факторов:

$$T_{ghg} = T_{pop} + T_{gwp/pop} + T_{e/gwp} + T_{ghg/e}. \quad (2)$$

Это тождество применимо только для секторов, где доминирует сжигание топлива (энергетика, транспорт и здания). В других секторах – промышленность, сельское хозяйство, землепользование и отходы – действуют другие драйверы выбросов ПГ.

Для промышленности предложено другое тождество (Башмаков, 2021). Оно (3) отражает видение, ориентированное на предоставление услуг от использования накопленного объема физического капитала.²⁾ В (3) появляется параметр материалоемкости, который представлен двумя пропорциями: отношение накопленного объема капитала (материалов) к ВПП (т/доллар) и отношение годового потребления материалов к накопленному объему капитала (т/т). Последняя пропорция показывает, сколько нужно материалов для использования накопленного капитала и замещения отслуживших свой срок его элементов. Для анализа на уровне страны или региона важно учитывать соотношение производства материала к его использованию внутри страны, включая материалы, воплощенные в импортируемых конечных товарах. Это позволяет провести различие между территориальными выбросами ПГ и выбросами ПГ, основанными на потреблении.

$$GHG = POP \cdot \frac{GDP}{POP} \cdot \frac{MStok}{GDP} \cdot \frac{MPR + MSE}{MStok} \cdot Dm \left(\frac{E}{(MPR + MSE)} \cdot \frac{(GHGed + GHGeind)}{E} + \frac{GHGoth}{MPR + MSE} \right). \quad (3)$$

меры политики	факторы
меры демографической политики	население
рационализация потребностей (sufficiency) и управление спросом	услуги (выраженные через ВВП на душу населения) – конечное потребление и инвестиции, необходимые для поддержания физического капитала
повышение эффективности использования физического капитала	отношение физического капитала (накопленного запаса ресурсов) к ВПП
снижение материалоемкости, замещение стали другими материалами, рост использования металлолома	расход стали – первичной (MPR) и вторичной (MSE) – на единицу физического капитала
меры торговой политики, нацеленные на снижение «утечки углерода»	доля выбросов ПГ, отнесенная на страну или регион (используется только для стран или регионов)*
повышение энергоэффективности производства продукции черной металлургии	расход энергии на производство продукции черной металлургии (E)
электрификация, декарбонизация топлива (применение низкоуглеродных топлив, водорода и синтетических топлив на основе захваченного углерода)	прямые (GHG _{ed}) и косвенные (GHG _{ind}) выбросы ПГ от сжигания топлива на единицу используемой энергии
декарбонизация сырья (использование водорода и применение CCUS в промышленных процессах)	выбросы ПГ от промышленных процессов и использования продукции
декарбонизация спроса	
декарбонизация производства	

*Dm=1, когда учитываются территориальные выбросы. Dm равно отношению стали, используемой внутри страны, к общему производству стали для учета выбросов на основе потребления.

²⁾ Весь объем материалов, воплощенный в созданных руками человека объектах, которые используются как для предоставления различных услуг (питания, мобильности, жилища, образования и др.), так и для производственных нужд.

Анализ на основе тождества (3) показал, что главными драйверами изменения выбросов ПГ от глобальной промышленности в 1970-2019 гг. были (рис. 3):

- рост населения и рост ВВП на душу населения (в сумме более 3% прироста в год на всех временных отрезках);
 - рост отношения косвенных выбросов к потреблению энергии за счет электрификации промышленности на всех временных отрезках, кроме 2000-2010 гг., когда за счет резкого промышленного рывка Китая выросла доля топлива за счет снижения доли электроэнергии. После 2000 г. этот фактор мало влиял на динамику выбросов. Однако декарбонизация мировой электроэнергетики уже начала давать первые плоды, и с 2014 г. этот фактор стал сдерживать рост выбросов ПГ от промышленности;
 - рост накопленного физического капитала с 1970 г. опережал динамику ВВП, то есть за последние полвека для наращивания ВВП на 1% нужен был еще больший рост физического объема капитала, а значит, снизить материалоемкость глобальной экономики не удалось;
 - потребность в текущем потреблении материалов как для замещения выбывающих элементов физического объема капитала, так и для его наращивания, а также для обслуживания накопленного физического капитала и для обеспечения нужд потребителей медленно снижалась, что позволяло тормозить динамику выбросов от промышленности;
 - это снижение отчасти обеспечивалось за счет динамичного развития циркуляционной экономики и роста использования вторичных материалов, которое также позволяло экономить энергию;
 - повышение энергоэффективности устойчиво и значительно (на 1.5-2.5% в среднем в год) сдерживало рост выбросов ПГ на всем временном горизонте;
 - в последние два десятилетия снижение углеродоемкости энергии, в том числе за счет электрификации в менее энергоемких отраслях промышленности, в малой степени тормозило рост выбросов ПГ;
 - рост выбросов от промышленных процессов и использования продукции (ППИП) отставал от использования материалов на всем временном отрезке, но более быстрый рост потребления материалов, чем рост потребления энергии, привел к тому, что с начала XX века выбросы от ППИП росли заметно быстрее, чем другие составляющие выбросов;
 - по сравнению с 2000-2010 гг. рост выбросов ПГ от промышленности замедлился, но ни одна составляющая выбросов ПГ от промышленности (кроме косвенных выбросов на отрезке 2014-2019 гг.) не снижалась:
-

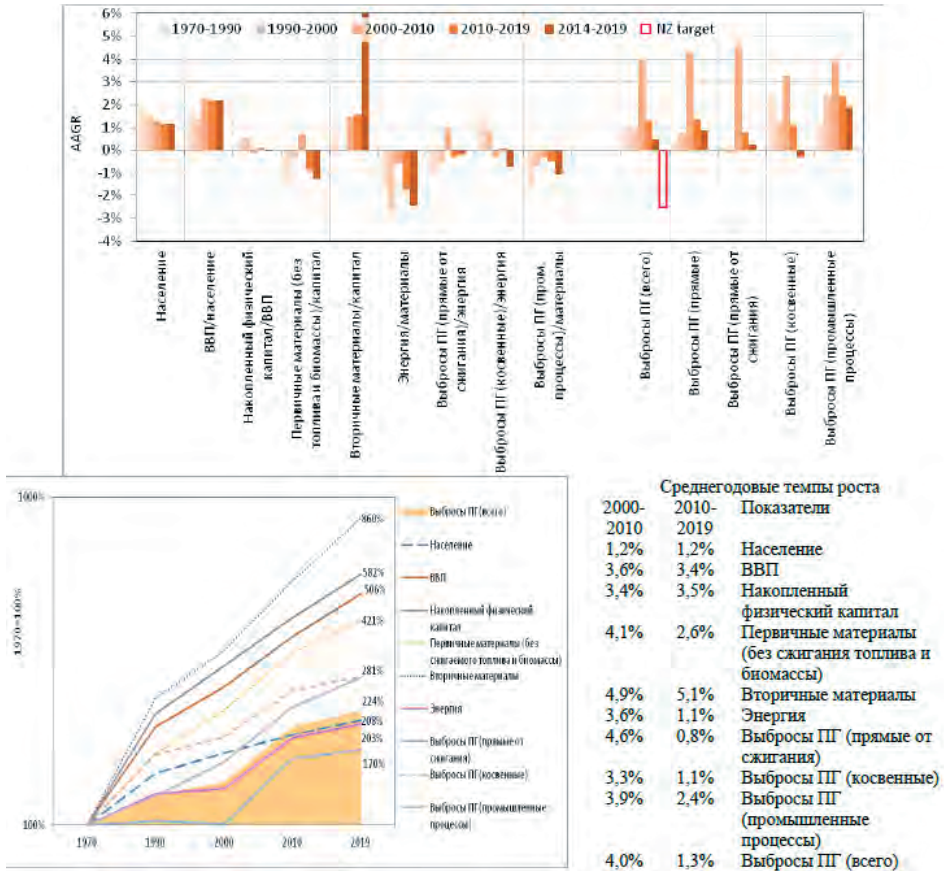


Рисунок 3. Динамика основных факторов, формирующих траектории выбросов CO₂ в промышленности (1990=1)

Figure 3. Evolution of the key factors that shape CO₂ emissions in industry (1990=1)

На нижнем левом графике использована логарифмическая шкала.

Источник: автор на основе данных IEA, 2021a; Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021 и WDI, 2021

Для перехода к углеродной нейтральности промышленности к 2050 г. необходимо снизить суммарные выбросы ПГ не менее чем на 2.5% в год на фоне их роста на 0.9% в среднем в 2010-2019 гг. Это означает, что промышленности необходимо по сравнению с 2010-2019 гг. ускорить снижение выбросов ПГ на 3.4%. Это крайне амбициозная задача. Для ее решения необходимо:

- задействовать имеющийся потенциал повышения энергоэффективности в промышленности;
- заметно снизить материалоемкость всей экономики. В ряде развитых стран (например, в Великобритании) уже произошел разрыв роста ВВП и накопленного физического капитала. Последний вышел на уровень насыщения при сохранении роста ВВП. Это достигается за счет продления сроков службы уже созданной инфраструктуры при ее модернизации; снижения массы элементов физического капитала при сохранении их свойств, позволяющих обеспечить выполнение основных функций предоставления жилищ-

ных услуг, обеспечения питанием, мобильности, связи, образования, здравоохранения, производства потребительских, промежуточных и инвестиционных товаров, а также государственных услуг;

- ускорить процессы электрификации и использования водорода, производимого на основе безуглеродной электроэнергии;
- заметно активизировать развитие циркуляционной экономики и наращивать использование вторичных материалов.

Вклад базовых материалов в глобальную динамику антропогенных выбросов ПГ

Прямые выбросы ПГ в промышленности достигли 11.8 Гт CO₂экв, а в сумме с косвенными – 17.7 Гт CO₂экв. В структуре выбросов в промышленности происходили заметные сдвиги:

- доля прямых выбросов от сжигания топлива устойчиво снижается с 71% в 1970 г. до 60% в 2019 г.;
- доля прямых выбросов от промышленных процессов, напротив, динамично растет;
- доля косвенных выбросов росла до 1990 г., а затем по мере роста доли базовых материалов в выпуске промышленной продукции стала снижаться, поскольку уровень электрификации производства базовых материалов ниже, чем в прочей промышленности.

Выбросы от промышленности можно разделить на выбросы от производства базовых материалов (черных и цветных металлов, строительных материалов, продуктов химии и целлюлозно-бумажной промышленности), а также производство прочей продукции – пищевой, текстильной, машиностроительной и др. Именно производство базовых материалов, с одной стороны, характеризуется самыми высокими выбросами ПГ, а с другой, сталкивается с самыми значительными сложностями при реализации стратегий декарбонизации. Это связано с высокими уровнями выбросов от промышленных процессов, потребностью в больших объемах сжигания топлива для получения высокотемпературного тепла и с более низкими уровнями электрификации.

Доля выбросов ПГ, порождаемых процессами производства базовых материалов, в структуре выбросов ПГ от промышленности (с учетом прямых и косвенных выбросов) выросла с 51% в 1970 г. до 62% в 2019 г. (рис. 4). Почти половина всех базовых материалов производится в Китае. Поэтому резкий рывок в экономическом развитии Китая привел к росту суммы прямых и косвенных выбросов, сопряженных с процессами производства базовых материалов, с 6.4 Гт CO₂экв. в 2000 г. до 10.9 Гт CO₂экв. в 2019 г., или на 70%.

Объем выбросов ПГ, сопряженных с процессами производства базовых материалов, в зависимости от уровней охвата источников выбросов ПГ оценивается в 10.7-11.8 Гт CO₂экв., или 18-20% всех антропогенных выбросов ПГ. Полученная выше оценка для охватов 1 и

2³) для 2019 г. на базе Lamb et al. (2021) равна 10.9 Гт CO₂экв. Оценка IEA (2020a) для охватов 1 и 2 равна 10.7 Гт CO₂экв. для 2018 г. и 10.3 Гт CO₂экв. для 2019 г. Hertwich (2021) оценил выбросы охватов 1, 2 и 3 («от колыбели до ворот») для 2018 г. в 11.8 Гт CO₂экв., включая 5.1 Гт CO₂экв. для металлов, 3.7 Гт CO₂экв. для строительных материалов, 1.8 Гт CO₂экв. для пластиков и резины, 1 Гт CO₂экв. для изделий из древесины, что суммарно составляет 20% от всех антропогенных выбросов. Эта оценка включает выбросы от транспортировки базовых материалов. Поскольку они равны примерно 1 Гт CO₂экв. (см. ниже), то получается, что все оценки дают сходный результат: в процессах производства базовых материалов (по охватам 1 и 2) выбросы ПГ равны примерно 10.8 Гт CO₂экв., а с учетом их транспортировки – 11.8 Гт CO₂экв.

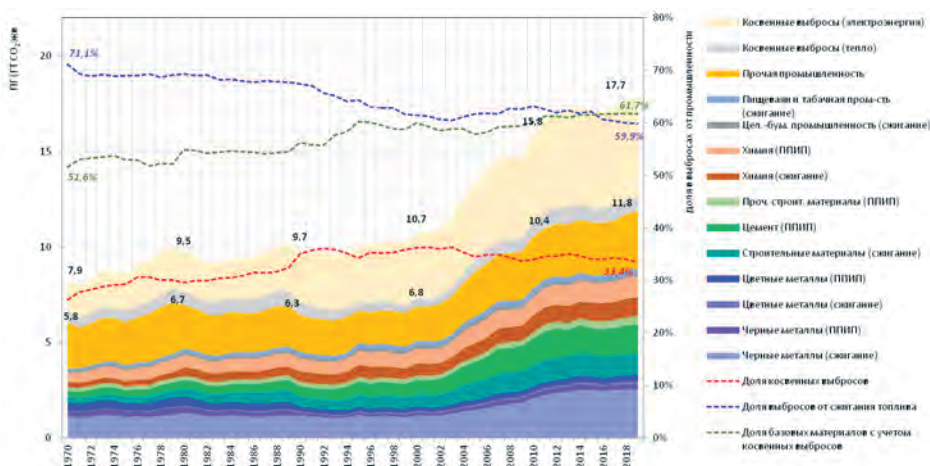


Рисунок 4. Динамика глобальных прямых и косвенных выбросов ПГ в промышленности в 1970-2019 гг.

Figure 4. Dynamics of global direct and indirect GHG emissions in industry in 1970-2019

Источники: автор на основе данных IEA. 2021a; Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021

При любом методе учета среди всех материалов по выбросам ПГ лидирует черная металлургия, на которую приходится более 4 Гт CO₂экв. воплощенных выбросов ПГ (рис. 5). Оценка масштабов выбросов ПГ существенно зависит от границ их учета. Указанная цифра для черных металлов отражает все источники выбросов всех ПГ по охвату 1+2+3. За черными металлами следуют химические продукты и цемент – примерно по 3 Гт CO₂экв. для каждого из них. На алюминий приходится еще 1.1 Гт CO₂экв. воплощенных выбросов ПГ. Таким образом, только на эти четыре группы продуктов приходится более 11 Гт CO₂экв, или львиная доля (более 90%) выбросов, воплощенных во всех базовых материалах, и более 62% выбросов ПГ, воплощенных во всех промышленных продуктах.

³) Охват 1: прямые выбросы ПГ при сжигании ископаемого топлива или от промышленных процессов. Охват 2: косвенные выбросы ПГ при сжигании ископаемого топлива при производстве потребленной электрической и тепловой энергии. Охват 3: прочие косвенные (воплощенные) выбросы ПГ, имевшие место на предшествующих стадиях производства товаров и услуг.

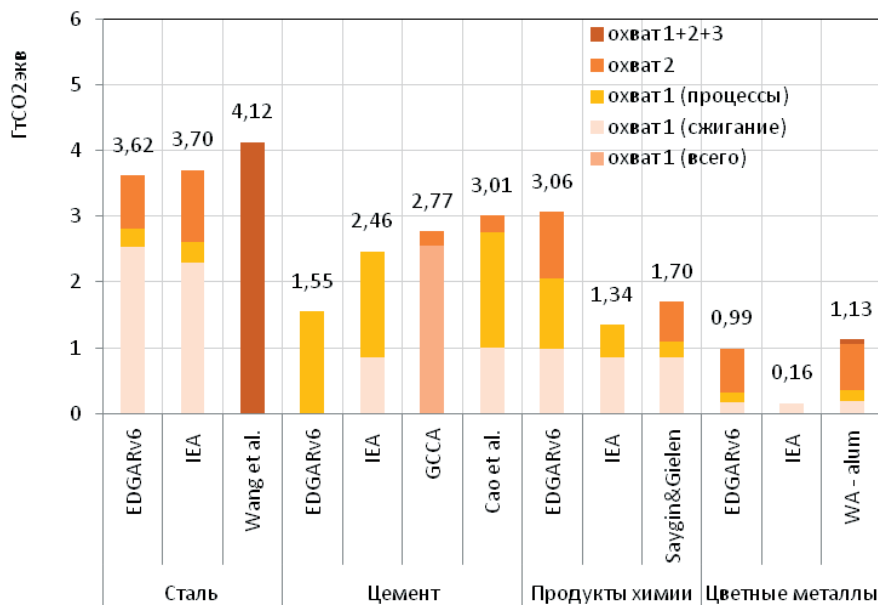


Рисунок 5. Выбросы ПГ при производстве основных базовых материалов в 2018-2019 гг.

Figure 5. GHG emissions from basic materials production in 2018-2019

Источники: Cao, Z. et al., 2020; Crippa, M. et al., 2021; GCCA, 2021; IEA, 2020b; Wang et al., 2021; International Aluminium Institute, 2021b; Saygin and Gielen, 2021

При расчете только по прямым выбросам лидирует также черная металлургия – 2.8 Гт CO₂экв. На строительные материалы приходится почти 2.7 Гт CO₂экв., из которых более 1.5 Гт CO₂экв. приходится на цемент и еще более 0.4 Гт CO₂экв. – на известь и доломит; на химические продукты – 2 Гт CO₂экв., на цветные металлы – более 0.4 Гт CO₂экв., а на целлюлозно-бумажную промышленность – менее 0.2 Гт CO₂экв. Таким образом, на эти группы базовых материалов приходится более 8 Гт CO₂экв., или 69% прямых выбросов ПГ в промышленности. Поэтому именно эти материалы находятся в фокусе исследований по снижению выбросов ПГ в промышленности.

Многие прочие материалы, например, цветные металлы, такие как медь, или никель являются довольно углеродоемкими, но производятся в существенно меньших объемах, поэтому их вклад в глобальные промышленные выбросы ПГ довольно скромнен.

Черная металлургия

Ретроспективные оценки мировых тенденций в области выбросов ПГ от черной металлургии из разных источников не совпадают из-за разницы в степени охвата видов деятельности, например, учет выбросов от промышленных процессов, от добычи железной руды, производства и использования извести и промышленных газов, из-за использования разных уровней охвата (охваты

1, 2 и 3) и по причине различий в источниках информации и методах ее обработки. Согласно данным Ламб и др. (2021), прямые выбросы ПГ от черной металлургии (охват 1) в 1970-2000 гг. имели тенденцию к медленному снижению, которая прервалась из-за резкого увеличения производства стали с высоким углеродным следом в Китае и Индии в 2000-2013 гг., что привело к выходу на новую полку после удвоения выбросов (рис. 6).

На черную металлургию в зависимости от уровня охвата источников ПГ приходится 3.3-4.1 Гт CO₂экв, или 6-7% суммарных антропогенных выбросов ПГ и 20-23% промышленных выбросов. Прямые выбросы ПГ от сжигания топлива в черной металлургии доминируют и в последние годы близки к 2.2 Гт CO₂экв, от промышленных процессов – еще 0.26 Гт CO₂экв., а в сумме – 2.47 Гт CO₂экв., или 21% суммарных прямых выбросов от промышленности и 4.2% суммарных антропогенных выбросов ПГ во всех секторах. Еще примерно 0.38 Гт CO₂экв. приходится на косвенные выбросы, связанные с производством потребляемых в черной металлургии электрической и тепловой энергии. По оценкам МЭА, прямые выбросы ПГ от черной металлургии составили 2.4 Гт в 2020 г. (IEA, 2020 c; IEA, 2021b) и 2.6 Гт в 2019 г. (IEA, 2020c). Косвенные выбросы оценены равными 1-1.1 Гт CO₂экв. в 2019 г. (IEA, 2020c и 2020b). В сумме получается 3.6-3.7 Гт CO₂экв.

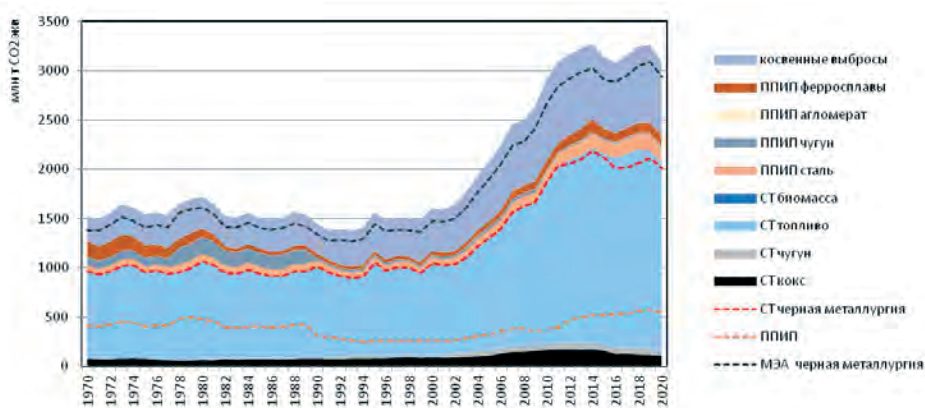


Рисунок 6. Динамика выбросов ПГ от мировой черной металлургии в 1970-2020 гг.
 (по данным МГЭИК и МЭА)

Figure 6. Dynamics of GHG emissions from the world iron and steel industry in 1970-2020
 (according to IPCC and IEA)

* СТ – выбросы от сжигания топлива. ППИП – выбросы от промышленных процессов и использования продуктов (по Методике МГЭИК)

Источники: Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021. Косвенные выбросы оценены на основе базы данных МЭА по потреблению электроэнергии и централизованного тепла IEA. 2021b и IEA 2021c.

В работе Ванг и др. (2021) выбросы от черной металлургии оценены равными 4.1 Гт CO₂экв. за счет расширенного отражения источников выбросов ПГ: дополнительно учтены выбросы при добыче железной руды, при транспортировке продукции черной металлургии и при производстве и использова-

нии извести, кислорода, сжатого воздуха, других промышленных газов, металлургических добавок (ферросплавы и др.) и т.п. Выбросы от черной металлургии в 2019 г. можно оценить следующим образом: по охвату 1 – 2.4 Гт CO₂экв, по охвату 2 – 0.8 Гт CO₂экв. и по охвату 3 – 1 Гт CO₂экв, или в сумме 4.2 Гт CO₂экв. При расчете по охватам 1+2+3 доля черной металлургии в суммарных выбросах ПГ в промышленности превышает 24%, а в суммарных антропогенных выбросах превышает 7%.

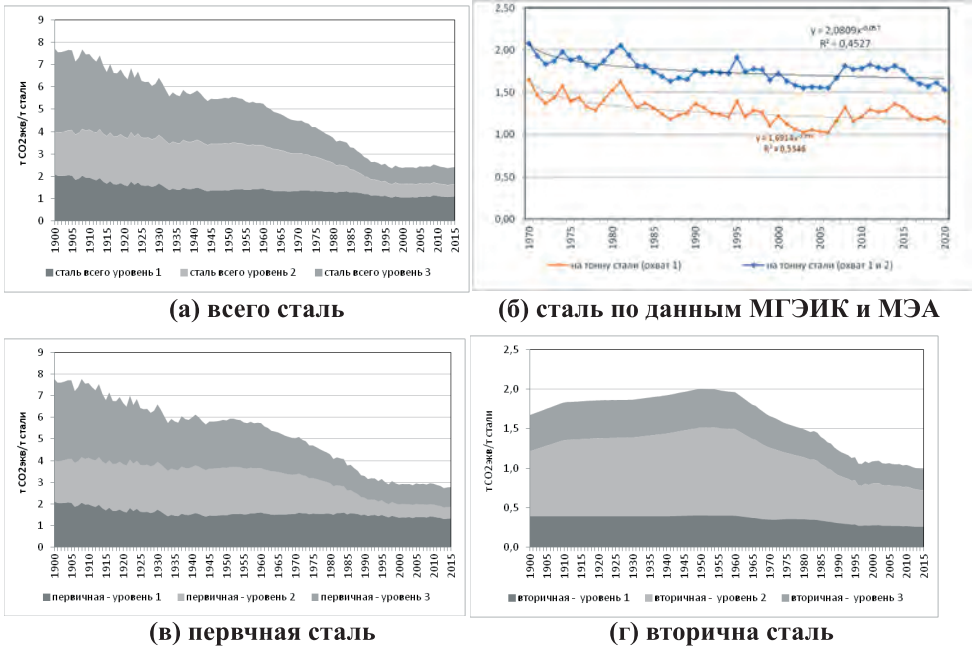


Рисунок 7. Динамика среднемировых удельных выбросов ПГ на тонну стали в 1900-2020 гг.

Figure 7. Evolution of average global specific GHG emissions per ton of steel in 1900-2020

Источники: Wang et al., 2021; Lamb et al., 2021. Косвенные выбросы оценены на основе базы данных МЭА (IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion online data service. data.iea.org/payment/products/115-co₂-emissions-from-fuel-combustion-2020-edition.aspx) по потреблению электроэнергии и централизованного тепла, а также на базе оценки косвенных выбросов ПГ по промышленности в целом

Согласно данным Ванг и др. (2021), в 2015 г. по охвату 1 удельные выбросы ПГ составили 1.1 т CO₂экв./т стали, по охвату 2 – еще 0.54 т CO₂экв./т, по охвату 3 – еще 0.77 т CO₂экв./т, а в сумме – 2.4 т CO₂экв./т. Последнее значение выше значений WSA и МЭА (2.2 тCO₂экв./т) за счет более широкого охвата источников выбросов ПГ. Снижение от уровня 1900 г. составило соответственно 1.9 раза, 3.5 раза, 4.9 раза и для суммы – 3.3 раза. То есть наиболее динамично снижалась компонента охвата 3.

Для первичной стали удельные выбросы по охвату 1 составили 1.3 т CO₂экв./т (1.4 МЭА), по охвату 2 – еще 0.56 т CO₂экв./т, по охвату 3 – еще 0.9 т CO₂экв./т, а в сумме – 2.8 т CO₂экв./т. По данным МЭА, для технологической цепочки «доменная печь – конвертер» прямые выбросы равны 1.2 т CO₂экв./т, а кос-

венные – 1 т CO₂экв./т. По данным WSA, сумма прямых и косвенных выбросов также равна 2.2 т CO₂экв./т.

Для вторичной стали удельные выбросы по охвату 1 составили 0.26 т CO₂экв./т стали, по охвату 2 – 0.46 т CO₂экв., по охвату 3 – еще 0.27 т CO₂экв./т, а в сумме – 0.99 т CO₂экв./т. По данным МЭА и WSA, при производстве стали на базе металлолома удельные выбросы равны 0.3 т CO₂экв./т, а на базе ПВЖ (газ) – 1.4 т CO₂экв./т. Отчасти рост доли вторичной стали позволял ускоренно снижать удельные выбросы в 1950-1995 гг. После 1995 г. доля вторичной стали стала снижаться, и снижение удельных выбросов ПГ практически прекратилось. Сходные результаты получаются по данным Ламб и др. (2021) и IEA (2020b и 2021c).

Таким образом, вывод Ванг и др. (2021) о том, что углеродоемкость стали стагнирует с 1995 г. по 2015 г. можно распространить на период до 2020 г. Это в значительной степени стало результатом роста доли производства стали в Китае и Индии, где удельные выбросы ПГ заметно выше среднемировых. В итоге тенденция к снижению удельных выбросов была нарушена. Постепенная стабилизация выплавки стали в Китае и декарбонизация этого сектора позволят восстановить тенденцию удельных выбросов ПГ к снижению. Можно сделать и другой вывод: требуемое для достижения углеродной нейтральности снижение удельных выбросов ПГ на 1 т стали не является беспрецедентным. Аналогичные по масштабу снижения уже были достигнуты дважды: в 1900-1930 гг. и в 1955-1985 гг.

Цветная металлургия

При расчете по охватам 1 и 2 выбросы ПГ от цветной металлургии в 2019 г. составили 1 Гт CO₂экв. (рис. 8). В основном это косвенные выбросы (64%), но также велика доля выбросов от ППИП и SF₆. Основные источники выбросов от сжигания ископаемого топлива – это процессы добычи и переработки руд цветных металлов. Суммарная величина всех выбросов только по одному алюминию (по охватам 1+2+3) – 1.13 ГтCO₂экв. – превышает оценки выбросов от всей цветной металлургии за счет разницы в охвате. Кроме того, в оценках по алюминию более точно отражаются косвенные выбросы от используемой электроэнергии по отдельным регионам, а значит, и по миру в целом.

На алюминий приходится 6% всех промышленных выбросов и 2% всех антропогенных выбросов. International Aluminium Institute является одной из немногих структур, которые ежегодно оценивают выбросы ПГ по всем сопряженным с производством алюминия источникам (охват 1+2+3). В табл. 2.1 показано, что суммарно выбросы ПГ от алюминиевой промышленности составляют 1.13 Гт CO₂экв. (табл. 1). Из них почти 60% – это косвенные выбросы ПГ, сопряженные с производством электроэнергии, которая расходуется на производство первичного алюминия. С учетом выбросов прочих ПГ, производства и использования анодов и вспомогательных материалов на долю производства первичного алюминия приходится 76% всех выбросов.

Вторым по значимости источником выбросов ПГ (18%) является производство глинозема. На долю транспорта сырья и алюминия приходится только 0.1%.

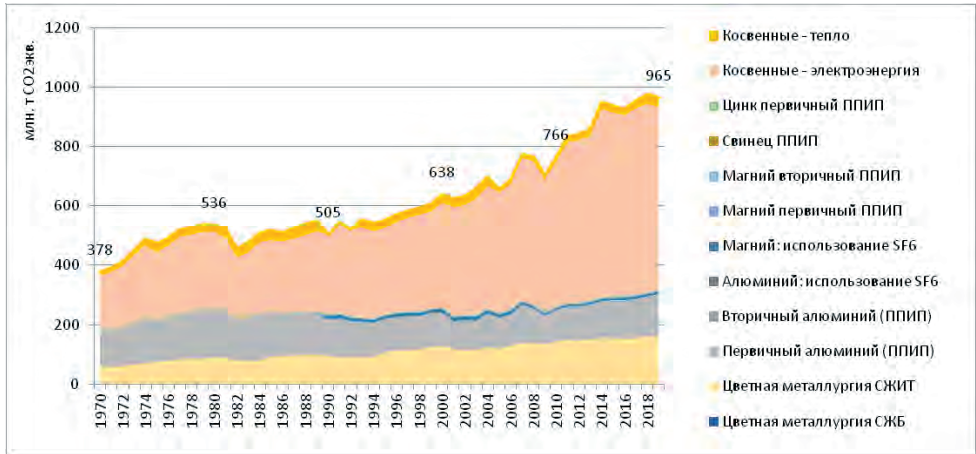


Рисунок 8. Динамика выбросов ПГ от мировой цветной металлургии в 1970-2020 гг.

Figure 8. Evolution of GHG emissions from global non-ferrous metals in 1970-2020

*СЖИТ – сжигание ископаемого топлива; СЖБ – сжигание биомассы;
ППИП – производственные процессы и использование продуктов.

Источники: автор на основе данных Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021; IEA, 2021b; IEA, 2021c.

Таблица 1. Выбросы ПГ от мировой алюминиевой промышленности в 2018 г. (млн т CO₂ экв.)

Table 1. GHG emissions from the global aluminum industry in 2018 (million t CO₂ eq)

	Добы- ча бок- ситов	Произ- водство глино- зема	Произ- водство анодов	Электр- ролиз	Литье	Вто- ричная перера- ботка*	Произ- вод- ство загото- вок	Пере- плавка лома на предпри- ятии	ВСЕГО
Электроэнер- гия (косв.)	0.6	16.9	-	670.6	-	3.1	9.5	2.5	703
Выбросы ПГ, кроме CO ₂ (прямые)	-	32.2	-	35.4	-	-	-	-	68
Технологи- ческие выбросы CO ₂ (прямые)	-	-	6.4	92.6	-	-	-	-	99
Вспомога- тельные мате- риалы (косв.)	-	14.8	19.3	6.4	-	-	-	-	41
Теплоэнергия (прямые/ косв.)	2.6	124.3	6.4	-	6.4	15.6	19.0	8.4	183
Транспорт (косв.)	-	15.4	-	18.7	-	-	-	-	34
Всего («от колыбели до ворот»)	3	204	32	824	6	19	29	11	1.127

Источник: International Aluminium Institute (IAI). Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050. March 2021

После 2005 г. тезис о стагнации углеродоемкости справедлив и для алюминия (рис. 9): в расчете на 1 т алюминиевого проката удельные выбросы ПГ не снизились. Снижение тормозил рост доли Китая в производстве алюминия с использованием углеродоемкой электроэнергии. Поэтому выбросы ПГ от алюминиевой промышленности росли почти так же, как и объемы производства алюминиевого проката – примерно в 2 раза в 2005-2019 гг. В 1900-2020 гг. удельный расход электроэнергии на производство алюминия снизился с примерно 50 тыс. кВт-ч/т (DOE, 2007) до 13.5-17 тыс. кВт-ч/т в разных регионах мира.⁴⁾ Углеродоемкость электроэнергии также заметно снизилась, а доля использования вторичного алюминия – повысилась. Так что в первой половине XX века удельные выбросы ПГ на 1 т алюминия были примерно в 2 раза выше значений 2005 г. Другими словами, опыт снижения удельных выбросов в масштабах, необходимых для полной декарбонизации алюминиевой промышленности, у человечества уже есть.

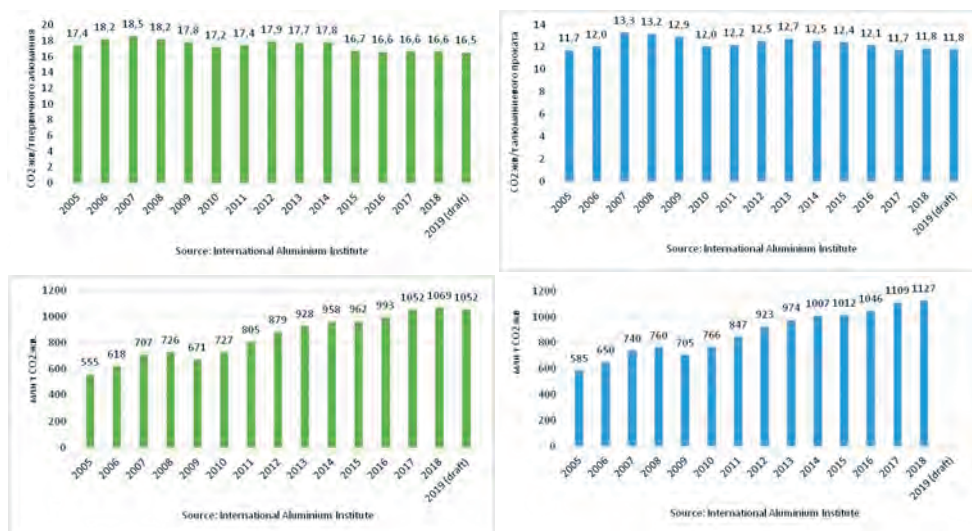


Рисунок 9. Динамика суммарных и среднемировых удельных выбросов ПГ при производстве первичного алюминия (слева) и алюминиевого проката (справа) в 2005-2019 гг.

Figure 9. Evolution of total and global average specific GHG emissions from primary aluminum (left) and rolled aluminum (right) production in 2005-2019

Источник: International Aluminium Institute (IAI). *Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050*. March 2021

Цементная промышленность

На производство клинкера и цемента приходится 17% всех выбросов от промышленности и 5% всех антропогенных выбросов. На промышленность строительных материалов в целом приходится 3.5 Гт CO₂ экв. выбросов ПГ по охватам 1 и 2 (рис. 10), из которых чуть больше 3 Гт CO₂ экв. прихо-

⁴⁾ Primary Aluminium Smelting Energy Intensity – International Aluminium Institute (international-aluminium.org).

дится на выбросы при производстве цемента. Динамика выбросов ПГ следовала за динамикой производства цемента, которая, в свою очередь, во многом определялась его производством в Китае, на долю которого пришлось без малого 60% мирового производства в 2019 г.

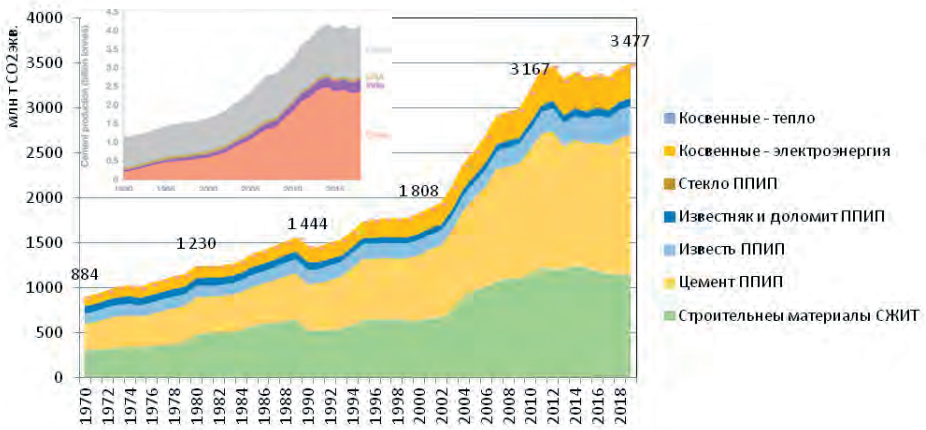


Рисунок 10. Динамика выбросов ПГ от мировой промышленности строительных материалов в 1970-2020 гг.

Figure 10. Evolution of GHG emissions from the global building materials industry in 1970-2020

* СЖИТ – сжигание ископаемого топлива; СЖБ – сжигание биомассы; ППИП – производственные процессы и использование продуктов. В окне – производство цемента по основным странам.

Источники: автор на основе данных Minx et al, 2021; Lamb et al, 2021; IEA, 2021: World energy balances. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (Accessed October 29, 2020); Andrew. 2019.

Из всех выбросов в цементной промышленности 0.9-1 Гт CO_2 экв. приходится на сжигание топлива, 1.6-1.75 Гт CO_2 экв. – на производственные процессы (кальцинация известняка в обжиговом агрегате) и еще 0.2-0.3 Гт CO_2 экв. – на косвенные выбросы при производстве используемых в отрасли электрической и тепловой энергии.

Учет нетто-выбросов в цементной промышленности осложняется тем, что в своем цикле жизни бетон является поглотителем CO_2 – повторная карбонизация (эффект губки) в объемах 0.6-1 Гт CO_2 в год всеми цементосодержащими продуктами.⁵⁾ Это примерно столько же, сколько дают выбросы от сжигания топлива. Есть предложения включить поглощение углерода цементосодержащими продуктами в методологию МГЭИК для национальных инвентаризаций парниковых газов (Stripple et al, 2018).

Для цементной промышленности несправедлив тезис о стагнации углеродоемкости, но справедлив тезис о ее очень медленном снижении (рис. 11). Удельные выбросы CO_2 на 1 т клинкера в 2000-2019 гг. снизились только на 4%, а на 1 т цемента – на 14% (на 0.8% в год) за счет снижения отношения цемент/клинкер с 82% в 2000 г. до 75% в 2019 г. и углеродоемкости

⁵⁾ Cao, Z. et al., 2020; GCCA, 2021a; Xi et al., 2016.

используемой энергии на 5% благодаря снижению доли используемого ископаемого топлива с 95% до 81%. По сравнению с серединой XX века удельные выбросы CO₂ на 1 т цемента снизились примерно в 2 раза за счет перехода от мокрого способа производства цемента к сухому, снижения отношения клинкер/цемент (95% в 1950 г.), перевода цементных заводов на природный газ и замещения ископаемого топлива. На такое снижение ушло около 70 лет. При движении к углеродной нейтральности в ближайшие 30-50 лет предстоит снизить удельные выбросы до нуля.

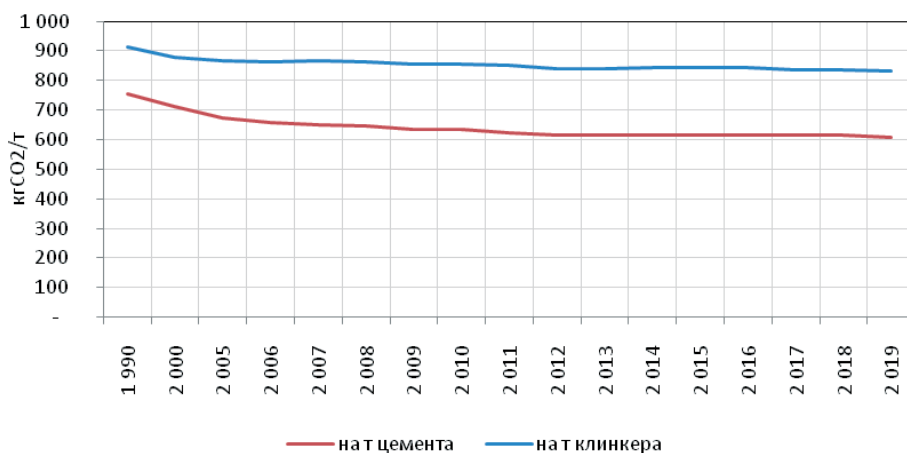


Рисунок 11. Динамика среднемировых удельных выбросов CO₂ при производстве цемента и клинкера

Figure 11. Evolution of average global specific CO₂ emissions from cement and clinker production

Источник: GCCA, 2021b

Химическая промышленность

Выбросы ПГ от химической промышленности превышают 3 Гт CO₂экв, или 17% всех промышленных выбросов и 5% всех антропогенных выбросов (рис. 12). Они примерно в равной пропорции состоят из выбросов от сжигания топлива, от ППИП и косвенных выбросов ПГ. Учет выбросов ПГ в химической промышленности осложняется тем фактом, что углерод долго хранится в продуктах. Около 35% массы химикатов составляет CO₂ (Levi, Cullen, 2018), который выделяется только на стадии их использования – при разложении удобрений или сжигании пластиковых отходов (Saygin, Gielen, 2021). По оценке МЭА, на производство аммиака в 2020 г. пришлось 450 млн тCO₂, метанола – 222 млн т, а пластиков и резин (high value chemicals) – еще 251 млн т (IEA, 2021b). При производстве химической продукции велика доля выбросов N₂O (аммиак и удобрения) и CH₄ (метанол и другие виды сырья для производства пластиков и резин). Многие химические процессы электро- и теплоемки, поэтому на косвенные выбросы приходится 670 млн т CO₂экв.

По оценке МЭА, в 2019 г. было произведено 538 млн т первичных химических продуктов (IEA, 2021a), а по оценке Saygin и Gielen (2021) – 642 млн т. Среди них доминируют аммиак, метанол и сырье для производства пластиков и резин (high value chemicals). Часть этих материалов идет на производство удобрений: в 2020/21 гг. было произведено немногим меньше 200 млн т удобрений (IFA, 2021). Если производство удобрений растет сравнительно медленно, то пластик и резин – очень динамично, что и порождает динамичный рост выбросов ПГ.

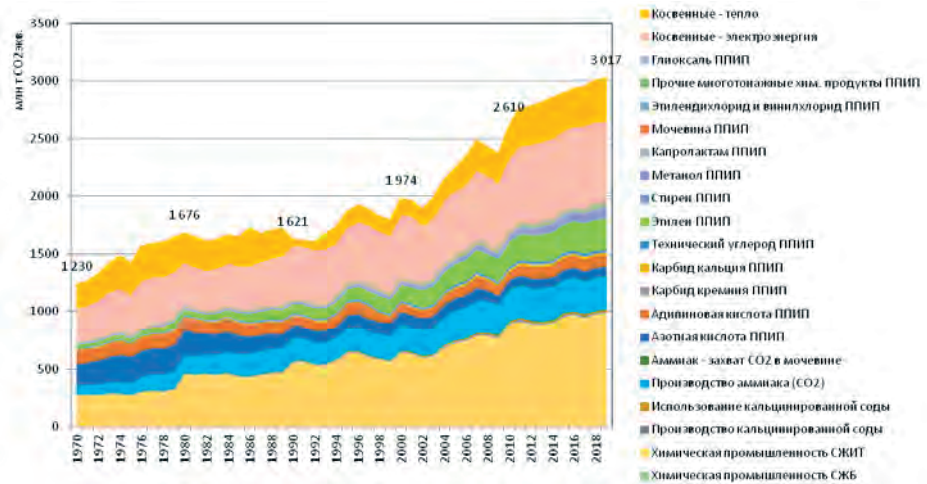


Рисунок 12. Динамика выбросов ПГ от мировой химической промышленности в 1970–2020 гг.

Figure 12. Evolution of GHG emissions from global chemical industry in 1970–2020

*СЖИТ – сжигание ископаемого топлива; СЖБ – сжигание биомассы; ППИП – производственные процессы и использование продуктов.

Источники: автор на основе данных Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021; IEA, 2021c; IEA, 2021d

Выбросы ПГ от транспорта базовых материалов

В 2019 г. грузооборот глобального транспорта составил 145 трлн т·км, а выбросы CO₂ от этого объема транспортной работы – 3.2 ГтCO₂ (ITF 2021). В сфере грузовых перевозок доминирует морской транспорт (более 70% грузооборота), но только 20% всех выбросов ПГ от грузового транспорта из-за его низкой углеродоемкости. Автомобильные грузоперевозки обеспечивают 15% грузооборота, но выделяют 44% всех выбросов CO₂ от грузового транспорта. Железные дороги и внутренние водные пути являются наименее углеродоемкими наземными видами транспорта. На железную дорогу приходилось 30% глобального грузооборота наземного транспорта.

Выбросы ПГ, сопряженные с транспортом базовых материалов, составляют около 1 Гт CO₂ экв. (рис. 13). Базовые материалы в основном транспортируются по воде, железной дороге и на грузовом транспорте (тяжелые грузовики). Поскольку часть нефти и газа используется в качестве сырья для нефте- и газохимии, часть выбросов ПГ, сопряженных с транспортиров-

кой ископаемых топлив, также может быть отнесена к транспортировке базовых материалов. Анализ данных Международного транспортного форума за разные годы позволяет оценить долю базовых материалов в суммарном грузообороте транспорта на уровне 35% (ITF, 2021 и другие годы). К сожалению, в этих данных не приводятся доли по отдельным видам грузового транспорта. Такая доля использовалась для оценки для железнодорожного, внутреннего, водного и морского транспорта.

На основе данных МЭА⁶⁾ все выбросы ПГ от грузового автомобильного транспорта были разделены на выбросы от легких и тяжелых грузовиков. Их соотношение в 2019 г. составило 1:1.9. Если допустить, что легкие грузовики не перевозят базовые материалы, то при общей доле всех грузовиков в грузообороте 35% доля базовых материалов в грузообороте тяжелых грузовиков, включая карьерные самосвалы, составит примерно 50%.

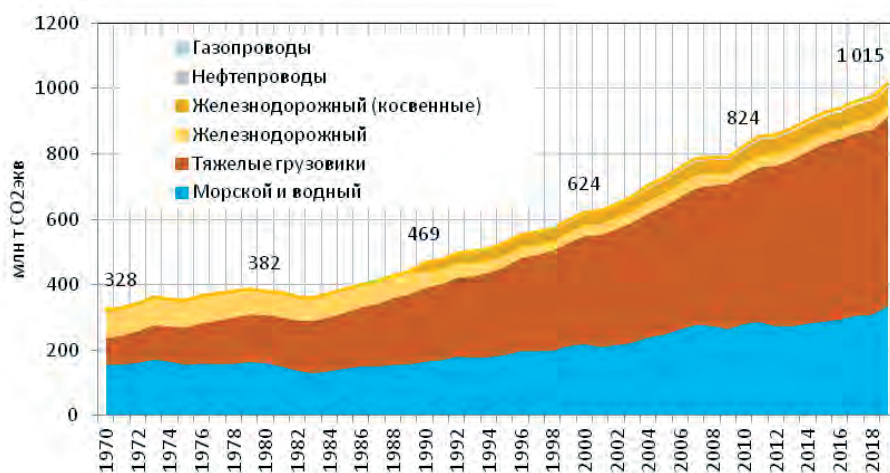


Рисунок 13. Динамика выбросов ПГ от транспорта базовых материалов в 1970-2020 гг.

Figure 13. Evolution of GHG emissions from transport of basic materials in 1970-2020

Источники: на основе данных Minx et al., 2021; Lamb et al., 2021; IEA, 2021d: CO₂ Emissions from Fuel Combustion online data service. data.iea.org/payment/products/115-co2-emissions-from-fuel-combustion-2021-edition.aspx; IEA, 2021c: World energy balances. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (Accessed: October 29, 2020).

Выбросы от транспорта базовых материалов в размере 1 Гт CO₂ экв. объясняют разницу в оценках выбросов ПГ. Если по охватам 1+2 она равна 10.8 Гт CO₂ экв., то по охватам 1. 2 и 3 («от колыбели до ворот») она увеличивается до 11.8 Гт CO₂ экв.

Заключение

Решение задачи декарбонизации глобальной промышленности требует самого большого по масштабам из всех секторов и динамичного снижения

⁶⁾ CO₂ emissions from trucks and buses in the Net Zero Scenario, 2000-2030 – Charts – Data & Statistics - IEA.

прямых и косвенных выбросов ПГ – почти на 18 Гт CO₂экв. При ожидаемом росте производства многих базовых материалов – вплоть до удвоения к 2050-2070 гг. – эта задача решается только за счет снижения удельных выбросов ПГ до нуля. Необходимые для этого масштабы их снижения уже были продемонстрированы в прошлом. Однако в последние 15-25 лет удельные выбросы ПГ при производстве многих базовых материалов стагнировали. Для того чтобы повторить прошлый опыт, необходима динамичная модернизация всей мировой промышленности на основе управления спросом на материалы по всем технологическим цепочкам, масштабное применение как новейших технологий повышения эффективности использования как энергии, так и материалов; низкоуглеродной электроэнергии, сырья, водорода; технологий CCUS, а также значимое масштабирование циркулярных материальных потоков. Многие из этих технологий уже появились, но еще не вышли на рынок или находятся на ранних стадиях применения и пока являются очень затратными.

Список литературы

Башмаков, И.А. (2021) Выбросы парниковых газов от мировой черной металлургии: прошлое, настоящее и будущее, *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*, т. 77, № 8, с. 882-901, doi: 10.32339/0135-5910-2021-8-882-901.

Andrew, R.M. (2019) Global CO₂ emissions from cement production. 1928-2018, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11(4), pp. 1675-1710, doi:10.5194/essd-11-1675-2019.

Cao, Z, et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent.* [Dataset], doi:http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b.

DOE (2007) *U.S. Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective. Theoretical Limits and Current Practices. Prepared for Industrial Technologies Program Energy Efficiency and Renewable Energy* U.S. Department of Energy February 2007. ITP Aluminum: Energy Requirements for the U.S. Aluminum Industry.

GCCA (2021a) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 p. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp->

GCCA (2021b) *GNR – GCCA in Numbers*, <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers>. (Accessed August 27, 2021).

Hertwich, E.G. et al. (2019) Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics. A review, *Environ. Res. Lett.*, 14(4), 043004. doi:10.1088/1748-9326/ab0fe3.

Hertwich, E.G. (2021) Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments, *Nat. Geosci.*, vol. 14, pp. 151-155, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00690-8>.

IEA (2020a) *Energy technology perspective special report-clean energy innovation*, Paris, France, 182 p.

UKCCC (2019) *Net Zero Technical Report*, London, UK, 302 p., <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>.

IEA (2020b) *Tracking industry 2020*, <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020> (Accessed December 20. 2020).

IEA (2020c) *Tracking industry 2020*, <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020> (Accessed December 20. 2020).

IEA (2020d) *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking*, <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

IEA (2021a) *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, Paris, 222 p.

IEA (2021c) CO₂ Emissions from Fuel Combustion online data service.data.iea.org/payment/products/115-co2-emissions-from-fuel-combustion-2021-edition.aspx. Database documentation, *Greenhouse gas emissions from energy. 2021 edition*; Supply – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis - IEA.

IEA (2021d) *World energy balance*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (Accessed October 29. 2020).

International Aluminium Institute (2021) *Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050*, London, UK, 20 p.

IFA Secretariat (2021) Public Summary Medium-Term Fertilizer Outlook 2021 – 2025 Market Intelligence Service 2021_ifa_medium_term_outlook_public_summary (1).pdf.

ITF (2021) OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/16826a30-en>.

ITF *Transport Outlook* (2019) https://doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en.

ITF *Transport Outlook* (2017) OECD iLibrary ([oecd-ilibrary.org](https://www.oecd-ilibrary.org)).

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S.L., Chapungu, S.J., Davis, I., Bashmakov, H. Dai, S., Dhakal, X., Tan, Y., Geng, B. Gu and Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, 16(7), [073005]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Levi, P.G., Cullen, J.M. (2018) Mapping Global Flows of Chemicals: From Fossil Fuel Feedstocks to Chemical Products, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52(4), pp. 1725-1734, doi:10.1021/acs.est.7b04573.

Minx, J. C., W. F. Lamb, M. Andrew, G. Canadell, Crippa, Döbbeling, H. Tian (2021) A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national

greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 5213–5252. 38 doi:10.5194/essd-13-5213-2021.

Stripple, H., C. Ljungkrantz, T. Gustafsson and R. Andersson (2018) *CO₂ uptake in cement-containing products. Background and calculation models for IPCC implementation*, 66 p.

Saygin, D. and D. Gielen (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector, *Energies*, vol. 14(13), p. 3772, doi:10.3390/en14133772.

Wang, P., M. Ryberg, Y. Yang, K. Feng, S. Kara, M. Hauschild and W-Q. Chen (2021) Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts, *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6> www.nature.com/naturecommunications.

WDI World Development Indicators. DataBank (worldbank.org).

Xi, F., Davis, S. J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y. and Liu, Z. (2016) Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880–883. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

References

Bashmakov, I.A. (2021) Vybrosov parnikovykh gazov ot mirovoj chernoj metallurgii: proshloe, nastoyashchee i budushchee [Greenhouse gas emissions from the global iron and steel industry: the past, present and future], *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii*, vol. 77, no. 8, pp. 882–901, doi: 10.32339/0135-5910-2021-8-882-901.

Andrew, R.M. (2019) Global CO₂ emissions from cement production. 1928–2018, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11(4), pp. 1675–1710, doi:10.5194/essd-11-1675-2019.

Cao, Z. et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent.* [Dataset], doi:<http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.

DOE (2007) *U.S. Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective. Theoretical Limits and Current Practices*. Prepared for Industrial Technologies Program Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy February 2007. ITP Aluminum: Energy Requirements for the U.S. Aluminum Industry.

GCCA (2021a) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 p. <https://gccassociation.org/concretetfuture/wp->

GCCA (2021b) *GNR – GCCA in Numbers*, <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers>. (Accessed August 27. 2021).

Hertwich, E.G. et al. (2019) Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics. A review, *Environ. Res. Lett.* 14(4), 043004. doi:10.1088/1748-9326/ab0fe3.

Hertwich, E.G. (2021) Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments, *Nat. Geosci.*, vol. 14, pp. 151-155, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00690-8>.

IEA (2020a) *Energy technology perspective special report-clean energy innovation*, Paris, France, 182 p.

UKCCC (2019) *Net Zero Technical Report*, London, UK, 302 p., <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>.

IEA (2020b) *Tracking industry 2020*, <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020> (Accessed December 20. 2020).

IEA (2020c) *Tracking industry 2020*, <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020> (Accessed December 20. 2020).

IEA (2020d) *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking*, <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

IEA (2021a) *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, Paris, 222 p.

IEA (2021c) CO2 Emissions from Fuel Combustion online data service. data.iea.org/payment/products/115-co2-emissions-from-fuel-combustion-2021-edition.aspx. Database documentation, *Greenhouse gas emissions from energy. 2021 edition*; Supply – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis - IEA.

IEA (2021d) *World energy balances*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (Accessed October 29. 2020).

International Aluminium Institute (2021) *Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050*, London, UK, 20 p.

IFA Secretariat (2021) *Public Summary Medium-Term Fertilizer Outlook 2021 – 2025* Market Intelligence Service 2021_ifa_medium_term_outlook_public_summary (1).pdf.

ITF (2021) *ITF Transport Outlook 2021*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/16826a30-en>.

ITF Transport Outlook (2019) https://doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en.

ITF Transport Outlook 2017 OECD iLibrary ([oecd-ilibrary.org](https://www.oecd-ilibrary.org)).

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khouradajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S.L., Chapungu, S.J., Davis, I., Bashmakov, H. Dai, S., Dhakal, X.,

Tan, Y., Geng, B. Gu and Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, 16(7), [073005]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Levi, P.G., Cullen, J.M. (2018) Mapping Global Flows of Chemicals: From Fossil Fuel Feedstocks to Chemical Products, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52(4), pp. 1725-1734, doi:10.1021/acs.est.7b04573.

Minx, J. C.W. F. Lamb, M. Andrew. G. Canadell, Crippa, Döbbeling... H. Tian (2021) A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970-2018 with an extension to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 5213-5252. 38 doi:10.5194/essd-13-5213-2021.

Stripple, H.. C. Ljungkrantz, T. Gustafsson and R. Andersson (2018) *CO₂ uptake in cement-containing products. Background and calculation models for IPCC implementation*, 66 p.

Saygin, D. and D. Gielen (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector. *Energies*, vol. 14(13), p. 3772, doi:10.3390/en14133772.

Wang, P., M. Ryberg, Y. Yang, K. Feng, S. Kara, M. Hauschild and W-Q. Chen (2021) Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6> www.nature.com/naturecommunications.

WDI World Development Indicators | DataBank (worldbank.org).

Xi, F., Davis, S. J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L. Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y. and Liu, Z. (2016) Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880-883, <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

Статья поступила в редакцию (Received): 13.01.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 28.02.2022.

Принята к публикации (Accepted): 22.05.2022.

Для цитирования /For citation:

Башмаков, И.А. (2022) Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 151-174, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-151-174.

Bashmakov, I.A. (2022) The scale effort required to decarbonize global industry, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 2, pp. 151-174, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-151-174.