

Оценка и прогнозирование углеродного следа металлургических предприятий Свердловской области

Н. В. Стародубец¹  , И. С. Белик¹ , Н. Л. Никулина² , Т. Т. Аликберова¹ 

¹ Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

² Институт экономики Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург, Россия

 n.v.starodubets@gmail.com

Аннотация. Достижение целей по снижению выбросов парниковых газов обеспечивается в том числе за счет мер прямого ценового регулирования, для реализации которых необходимым условием является расчет углеродного следа продукции. В то же время целевые значения углеродного следа могут использоваться в качестве управляющих параметров для установления отраслевых показателей снижения выбросов парниковых газов, а также для предоставления мер государственной поддержки предприятий. Целью работы является развитие методического подхода к использованию показателя «углеродный след продукции» в качестве параметра оценки текущего и прогнозного значений выбросов парниковых газов предприятий отраслей, попадающих под углеродное регулирование. Гипотеза исследования состоит в обосновании применения целевых значений показателя «углеродный след продукции» для стратегических оценок выбросов парниковых газов в процессе декарбонизации отраслей промышленности. Для этого в работе рассмотрен организационно-экономический механизм Европейской системы торговли квотами на выбросы парниковых газов. Описан методический подход к определению углеродного следа металлургической продукции, выполнены расчеты углеродного следа металлургических предприятий Свердловской области. Расчеты, основанные на усредненных показателях углеродоемкости продукции российских металлургических предприятий, показали, что совокупный углеродный след металлургического сектора Свердловской области по итогам 2021 г. составляет 21,8 млн тонн CO₂-экв., целевое его значение может составлять 16,7 млн тонн CO₂-экв. Различия в значениях обусловлены существующей структурой выпускаемой продукции и применяемыми технологиями. Разработка стандартных метрик оценки выбросов парниковых газов на уровне предприятия, регулярное проведение такой оценки и ее подтверждение независимой организацией (верификация) является подготовительным этапом, дающим возможность запуска механизма торговли квотами на выбросы парниковых газов на уровне региона или страны. Также углеродный след продукции может выступать управляющим параметром в ходе установления количественных значений объема снижения выбросов парниковых газов. Предлагаемый методический подход может использоваться лицами, принимающими решения, для формирования региональной политики декарбонизации.

Ключевые слова: торговля квотами на выбросы; углеродоемкость продукции; учет выбросов парниковых газов; инструменты углеродного регулирования; выбросы парниковых газов в металлургии; бенчмаркинг; наилучшие доступные технологии; декарбонизация.

1. Введение

Для достижения целей, связанных со снижением воздействия на климат, все больше стран, регионов, городов, компаний вводят системы регулирования выбросов парниковых газов (ПГ). Так, к 2021 г. было введено более 60 программ по углеродному регулированию на местном, национальном и международном уровнях [1]. При этом в программах используются как административные (в основном законодательные ограничения, нормативы, стандарты и др.), так и экономические меры регулирования выбросов ПГ.

Задачей экономических мер является создание мотивации к сокращению выбросов ПГ с помощью экономической заинтересованности. В качестве стимулирующих инструментов, относящиеся к прямому ценовому углеродному регулированию (*direct carbon pricing instruments*) используют углеродный налог, стоимость разрешения на единицу выбросов ПГ в рамках системы торговли квотами на выбросы, плата за углеродное содержание ввозимой продукции, углеродное

софинансирование проектов (*carbon crediting mechanism*) и др.

Подробная классификация мер углеродного регулирования содержится в работе Белик и др. [2]. Обзор инструментов прямого ценового углеродного регулирования и факторов, влияющих на цену углерода, представлен в работе Ji et al. [3].

В мировой практике также находят применение меры косвенного ценового углеродного регулирования, оказывающие опосредованное влияние на цену углеродоемких товаров, например дополнительные налоги на топливо с высоким углеродным содержанием и др. При этом наиболее распространенными в мире являются системы углеродного налогообложения и системы торговли квотами на выбросы.

По данным Всемирного банка¹, в апреле 2022 г. прямые ценовые ме-

¹ World Bank. 2022. State and Trends of Carbon Pricing 2022. State and Trends of Carbon Pricing. Washington, DC: World Bank. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/a1abead2-de91-5992-bb7a-73d8aaaf767f>

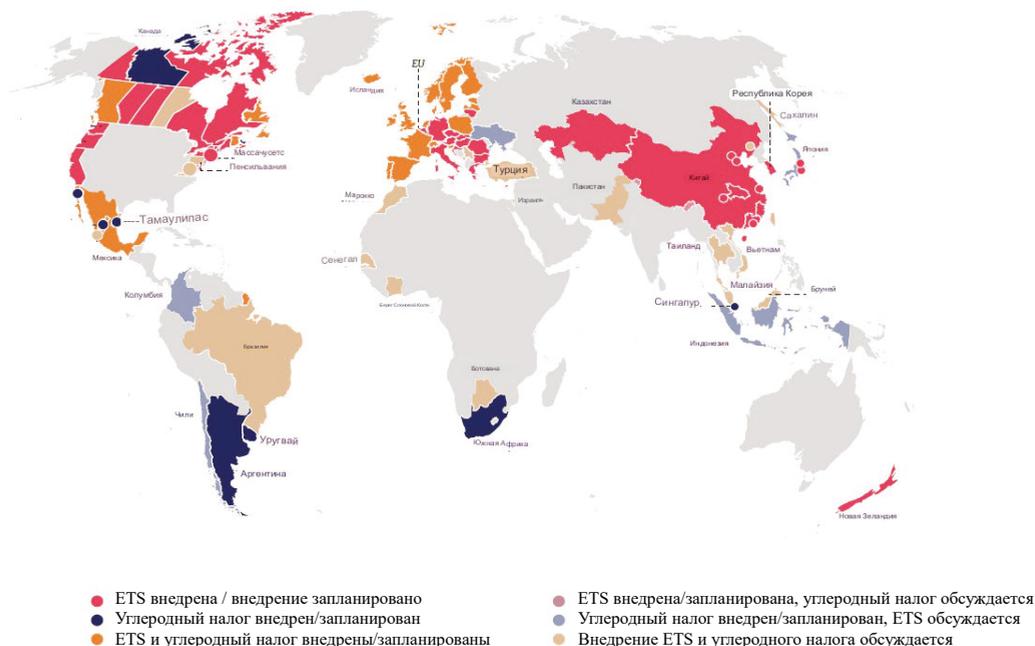


Рис. 1. Распространение механизмов ценового углеродного регулирования в мире
 Figure 1. Distribution of carbon pricing instruments in the world

ханизмы регулирования выбросов ПГ покрывали 23 % глобальных выбросов ПГ и включали в себя 37 страновых систем углеродного налогообложения, и 34 страновых системы торговли квотами на выбросы (*Emissions trading system (ETS)*) (рис. 1), крупнейшей из которых является европейская система торговли квотами на выбросы – *EU ETS*, которая в 2021 г. включала в себя 10,4 тыс. установок промышленных предприятий и 350 авиалиний, под ее регулированием находились 36 % всех выбросов ПГ ЕС¹.

Успешное применение ценовых механизмов углеродного регулирования одними странами и отсутствие подобных механизмов в других странах привело к активному обсуждению проблемы «утечки» углерода (*carbon leakage*) – перемещения производств в страны с низкими углеродными издержками. ЕС увидел потенциальное решение данной проблемы во внедрении наднациональной меры углеродного регулирования – трансграничного углеродного регулирования (ТУР).

Предпосылки создания механизма ТУР, его возможности в борьбе с утечками углерода и его перспективы описаны в работе Makhholm [4]. Описание механизма ТУР, его участников, взаимодействия между ними и порядка расчета платежей в рамках ТУР применительно к российским предприятиям содержится в работах Стародубец и др. [5], Belik et al. [6].

Принцип действия механизма ТУР заключается в необходимости приобретения предприятиями, импортирующими углеродоемкую продукцию в ЕС, специальных углеродных сертификатов, которые бы покрывали содержание углерода во ввозимой продукции. По сути, речь идет об уплате импортером в ЕС

своеобразной ввозной пошлины на углерод, что делает механизм ТУР по своей природе схожим с углеродным налогообложением. При этом средства, полученные регулятором, будут направлены на меры декарбонизации внутри ЕС.

Введение данного механизма ориентировано на решение проблемы «утечки» углерода и на стремление сохранить конкурентоспособность отраслей ЕС, производящих углеродоемкую продукцию. Другие страны мира также рассматривают возможность внедрения подобных механизмов, в частности перспективы введения мер ценового углеродного регулирования в странах Азиатского региона рассмотрены в работе Doda et al. [7].

Поскольку основой для расчета величины платежей в рамках ТУР, торговли квотами на выбросы, углеродного налога является углеродное содержание конкретного товара, участники перечисленных механизмов должны последовательно измерять углеродный след своей продукции. При этом желательно, чтобы подходы к его измерению были схожи. О важности использования единых подходов к определению удельных выбросов парниковых газов на корпоративном уровне говорится, в частности, в работе Volay et al. [8].

Также без информации о выбросах ПГ конкретных установок невозможно задать целевые значения выбросов ПГ для предприятий отрасли, в том числе при формировании территориальных рынков торговли квотами на выбросы парниковых газов. В этом смысле определение углеродного следа предприятий определенной территории является необходимым подготовительным этапом при создании таких рынков, что отмечено в работе Bailey [9].

Целью работы является развитие методического подхода к использованию показателя «углеродный след продукции» в качестве целевого для оценки текущего и прогнозного значений выбросов парниковых газов предприятий

¹ EU ETS 101. A beginner's guide to the EU's Emissions Trading System. URL: <https://carbonmarketwatch.org/publications/eu-ets-101-a-beginners-guide-to-the-eus-emissions-trading-system/>

отраслей, попадающих под углеродное регулирование.

Гипотеза исследования состоит в обосновании применения целевых значений показателя «углеродный след продукции» для стратегических оценок выбросов парниковых газов в процессе декарбонизации отраслей промышленности.

Для достижения цели выполнены следующие *задачи*, что нашло отражение в структуре статьи:

1. Описать организационно-экономический механизм европейской системы торговли квотами на выбросы ПГ (*EU ETS*), а также описать подход к определению выбросов парниковых газов промышленных предприятий.

2. Рассмотреть существующие методические подходы к определению углеродного следа продукции, дать их оценку.

3. Выполнить расчеты углеродного следа металлургических предприятий Свердловской области.

4. Выполнить прогноз выбросов ПГ для металлургических предприятий Свердловской области с использованием целевых значений углеродного следа металлургической продукции как управляющего параметра.

2. Литературный обзор

2.1. Способы интернализации внешних эффектов

Выбросы загрязняющих веществ, в том числе и выбросы ПГ, традиционно относят к так называемым внешним эффектам – дополнительным издержкам населения, государства, компаний, которые не участвуют в конкретных рыночных сделках, но вынуждены нести расходы на восстановление здоровья, на устранение последствий изменения климата (наводнения, засухи и т. д.), на восстановление почв и проч. Содержание внешних эффектов подробно описано в работе Randall [10].

Для справедливого учета внешних эффектов и реализации принципа

«загрязнитель платит» необходимо их интернализировать, что может быть реализовано с помощью внешних соглашений (теорема Коуза [11]), либо с помощью государственного вмешательства.

Согласно Коузу [11], государственное вмешательство не требуется в случае, если четко определены права собственности, вовлечено небольшое число участников, величина транзакционных издержек по совершению сделки мала. В этом случае роль государства сводится к поощрению к сделке между заинтересованными лицами. Определяя право собственности, государство устанавливает цену для внешнего эффекта, создавая вмененные издержки для обеих сторон, как следствие, возникает потребность найти решение проблемы внешних эффектов происходит их интернализация.

Критика теоремы Коуза состоит в том, что в реальности чаще всего речь идет о большом числе участников, крупных сделках и большой величине транзакционных издержек, что, в частности, описывается в работе Данилова-Данильяна [12]. При этом главным выводом из теоремы Коуза может являться тот факт, что четко сформулированные права собственности на внешние эффекты способствуют решению проблемы внешних эффектов.

Другим способом интернализации внешних эффектов является государственное вмешательство, реагирующее на так называемые «провалы рынка» – ситуации, когда рынок не может интернализировать внешние эффекты самостоятельно, и которое заключается в прямом контроле (законы, запрещающие отдельные виды деятельности, все виды нормирования и проч.), вводе налогов («пигувианские» налоги на загрязнение окружающей среды Пигу [13]). Именно по данному пути в основном развивалось государственное регулирование в сфере охраны окружающей среды и рационального природопользования.

Также может применяться ограниченное государственное вмешательство (как комбинация двух вышеприведенных подходов), когда, например, государство законодательно формирует рынок прав на внешние эффекты, участвует в создании институциональной площадки для торговли данными правами и затем контролирует ее работу, задавая необходимые стратегические ориентиры.

Примером реализации такого регулирования является механизм торговли квотами на выбросы на площадке *EU ETS*, который действует в Европейском союзе с 2005 г. Подробное описание механизма и экономический эффект от его работы представлен в работе Zhang & Wei [14]. В работе Convery [15] представлена история создания и развития Европейской системы торговли квотами на выбросы.

2.2. Обзор механизма работы *EU ETS*

EU ETS относится к механизму *cap-and-trade* – ограничений и торговли. Ограничиваются в данном случае выбросы ПГ в текущем периоде. Постепенное снижение величины разрешенных выбросов позволяет достигать

ЕС долгосрочных низкоуглеродных целей. В 2023 г. долгосрочной целью является сокращение выбросов ПГ на 55% до 2030 г. в сравнении с уровнем 1990 г. – *Fit for 55 package*. Подробное описание амбициозных долгосрочных целей ЕС по снижению выбросов ПГ содержится в работе Queminn [16].

Таким образом, предельная величина выбросов ПГ фиксируется государством, в то время как цена на единицу выбросов устанавливается рынком. В настоящее время углеродное регулирование ЕС распространяется на следующие секторы: производство электроэнергии, промышленность, авиация.

В рамках *EU ETS* государством устанавливается фиксированный верхний предел выбросов ПГ («потолок»), отвечающий национальным целям по снижению выбросов ПГ, который затем переводится в квоты (разрешения) на выбросы – *EU Allowances (EUA)*, каждая из которых дает разрешение на выброс одной тонны CO_2 -эквивалента.

Все разрешения делятся на две части: 1) часть квот поступает на аукцион; 2) другая часть распределяется бесплатно между предприятиями отраслей, подверженных риску утечки углерода.

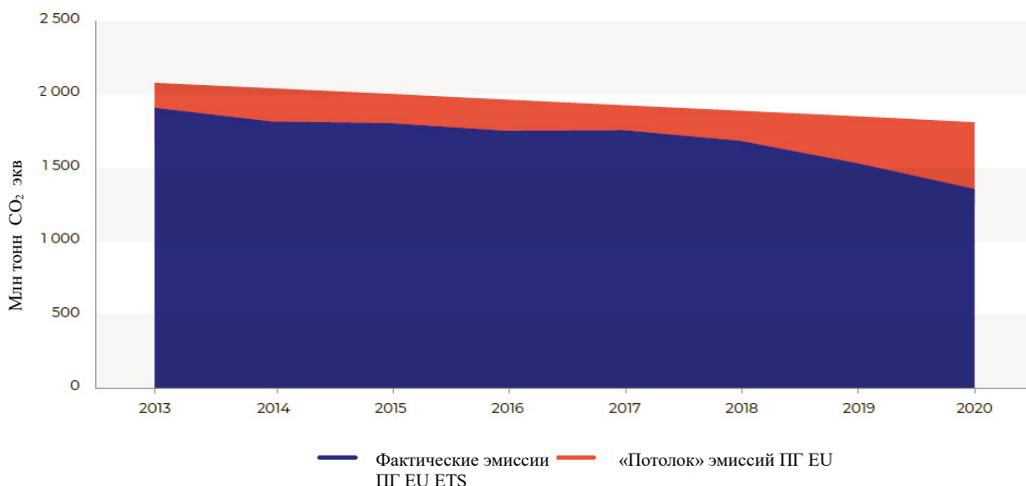


Рис. 2. Фактические эмиссии ПГ ЕС и «потолок» эмиссий ПГ за 2013–2020 гг.¹

Figure 2. Actual EU GHG emissions and GHG emission cap for 2013–2020

Очевидно, что цена на единицу разрешения во многом зависит от величины разрешений на выбросы ПГ, поступившей на аукцион, в 2021 г. их доля составила 57%. Данный вопрос является предметом обсуждения. Подробное критическое описание механизма распределения квот и возникающих сложностей содержится в работе Sato et al. [17]. Фактические выбросы ПГ ЕС и «потолок» представлены на рис. 2.

Что касается участия предприятий в *EU ETS*, до 30 апреля каждого года все предприятия, попадающие под углеродное регулирование, должны передать в регистрирующий орган (*Central Registry*) число разрешений на выбросы (*EUAs*), равное выбросам парниковых газов предприятия за прошлый год. Неиспользованные разрешения на выбросы (*EUAs*) могут быть проданы другим предприятиям либо сохранены для использования в последующие периоды. Для предприятий обязательны ежегодный учет выбросов парниковых газов и верификация отчетности у независимой организации.

У предприятий существует три способа получения разрешений на выбросы ПГ для покрытия своих фактических углеродных выбросов.

Во-первых, приобрести на аукционе, который проводит *European Energy Exchange*. Доходы от продажи разрешений на выбросы ПГ поступают в страны – участники *EU ETS* в объеме, пропорционально их доле в совокупных выбросах ПГ ЕС. Половина указанных доходов должна быть использована на мероприятия, связанные со снижением выбросов ПГ. За период с 2013 по 2020 г. доходы от продажи

EUA составили 68 млрд евро, из которых 19 млрд были получены в 2020 г.²

Во-вторых, получить бесплатно в том случае, если отрасль подвержена «утечке» углерода. Фактически в список таких отраслей попадает вся промышленность (кроме энергетики, где бесплатные разрешения не выдаются с 2013 г.) и авиация. При этом количество бесплатных разрешений, на которое может рассчитывать предприятие, будет определено исходя из значений удельных выбросов ПГ 10% лучших с точки зрения углеродоемкости установок ЕС. Данное условие призвано стимулировать предприятия снижать свой углеродный след: в случае, если фактические выбросы ПГ окажутся выше расчетных, предприятию придется приобрести недостающие разрешения на выбросы. Если же предприятие не превысит расчетные показатели, излишком разрешений оно может распорядиться по своему усмотрению.

На сегодняшний день до 95% выбросов ПГ промышленных предприятий и авиации покрывается бесплатными разрешениями, что является предметом обсуждений и возможных изменений, поскольку существует справедливое мнение, что раздача бесплатных разрешений не стимулирует промышленные предприятия снижать углеродоемкость [18]. С началом работы ТУР с 2025 г. предполагается, что доля бесплатных квот будет снижаться, т.к. промышленные предприятия ЕС получают защиту от «утечки» углерода [19].

В-третьих, приобрести на вторичном рынке. На сегодняшний день можно продавать и покупать *EUAs*, в том числе полученные бесплатно.

Схематично взаимодействие между участниками *EU ETS* представлено на рис. 3.

¹ EU ETS 101. A beginner's guide to the EU's Emissions Trading System. URL: <https://carbonmarketwatch.org/publications/eu-ets-101-a-beginners-guide-to-the-eus-emissions-trading-system/>

² EU ETS 101. A beginner's guide to the EU's Emissions Trading System. URL: <https://carbonmarketwatch.org/publications/eu-ets-101-a-beginners-guide-to-the-eus-emissions-trading-system/>



Рис. 3. Организационная схема EU ETS

Figure 3. EU ETS organizational chart

Таким образом, для всех предприятий, участвующих в системе торговли квотами на выбросы, актуальным становится определение углеродного следа своей продукции.

Во-первых, от этого зависит величина приобретаемых разрешений на выбросы ПГ.

Во-вторых, очевидно, у предприятий возникает потребность сравнивать свои показатели с целевыми («эталонными») значениями по соответствующим технологическим процессам, с так называемыми бенчмарками, а для предприятий, получающих бесплатные разрешения на выбросы ПГ, сравнение с показателями 10% лучших с точки зрения углеродоемкости установок ЕС является строго обязательным. Бенчмарки также широко используются при определении целевых показателей выбросов ПГ на уровне проекта, предприятия, региона, страны, в том числе при принятии решения о предоставлении «зеленого» финансирования.

В-третьих, в рамках ТУР в определенных случаях при расчете величины углеродных платежей предприятиями-импортерами предполагается использование усредненных значений 10% худших с точки зрения углеродоемкости установок ЕС.

При этом необходима сопоставимость между подходами к определению

углеродного следа предприятия и системами бенчмаркинга, о чем пойдет речь в следующем разделе статьи.

2.3. Обзор методических подходов к определению углеродного следа металлургических предприятий

Металлургический сектор является крупным источником выбросов парниковых газов, на его долю приходится 7% общих мировых выбросов¹. Доля металлургии в структуре антропогенных выбросов парниковых газов в России составляет 4,8%. Такие оценки приводятся в работе Симонян [20]. Для производства стали используется природное сырье и/или металлолом. Наиболее распространенными маршрутами производства стали в мире являются маршрут доменная печь – кислородный конвертер и электродуговая печь с использованием лома.

Общий подход к оценке углеродного следа продукции и организации в целом базируется на методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Он

¹ Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking, International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

подробно описан в серии стандартов ISO 14064 (в РФ – ГОСТ Р ИСО 14064). Особенности применения стандартов описаны в работе Gao et al. [21].

Дополнительно при оценке углеродного следа товара (услуги) возникают вопросы, связанные с определением границ такой оценки. Ответ на них представлен в теории и практике оценки жизненного цикла товара/услуги (*Life Cycle Assessment*), который базируется на ISO 14040/44. В нем содержатся основные принципы и составляющие данного метода: выбор границ системы и единиц измерения, подходы к проведению оценки, включая оценку неопределенности. Основной идеей является оценка совокупного воздействия на окружающую среду, включая выбросы парниковых газов, на протяжении всего жизненного цикла товара (услуги).

Существует большой пул работ, в которых была выполнена оценка углеродного следа металлургической продукции на основании стандартов, приведенных выше.

Renzulli et al. [22] приводят оценку воздействия производства стали по маршруту доменная печь – кислородный конвертер, включая выбросы парниковых газов, для итальянского металлургического завода полного цикла.

Аналогичные расчеты с применением подхода оценки жизненного цикла выполнены:

- для металлургических заводов Австралии Norgate et al. [23];

- для металлургического завода полного цикла в Польше Burchart-Korol [24];

- для нескольких металлургических предприятий полного цикла Chisalita et al. [25];

- для металлургического завода полного цикла в Германии Backes et al. [26].

Во всех приведенных исследованиях использовался единый подход к оценке воздействия производства стали на окружающую среду, включая выбросы парниковых газов, «от колыбели до ворот»

(cradle-to-gate), с учетом потребления электроэнергии из сети, что соответствует охвату 1, 2 в соответствии с ISO 14064.

Во всех приведенных работах были получены сопоставимые результаты по удельным выбросам парниковых газов на тонну произведенной стали по маршруту доменная печь – кислородный конвертер, и они составили от 1,6 т CO₂-экв./т продукции до 2,3 т CO₂-экв./т продукции.

Аналогичные расчеты были выполнены для производства стали по маршруту лом – электродуговая печь, и удельные значения выбросов парниковых газов составили от 0,6 до 0,9 т CO₂-экв./т продукции (IEAGHG (2011)¹).

Лисиенко и др. [27] с использованием авторского методического подхода к определению «сквозных эмиссий» парниковых газов, который не противоречит ни основам подхода оценки жизненного цикла товаров/услуг, ни принципам, заложенным в ISO 14064, выполнили оценку выбросов парниковых газов (без учета косвенных эмиссий от энергоресурсов) для различных сочетаний переделов металлургических производств.

В работе ЦЭНЭФ-XXI² приводятся оценки углеродного следа продукции российских металлургических предприятий для разных маршрутов производства стали, и они составляют 2,213 т CO₂-экв./т чугуна, 1,896 т CO₂-экв./т конверторной стали, 0,321 т CO₂-экв./т электростали (охваты 1, 2 в соответствии с ISO 14064).

¹ IEAGHG. Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage. International Energy Agency Greenhouse Gas. Research & Development Programme, Paris. URL: <https://ieaghg.org/publications/technical-reports/reports-list/9-technical-reports/1033-2011-06-potential-for-biomass-and-carbon-dioxide-capture-and-storage>

² ЦЭНЭФ. СВМ. Последствия для российской экономики. URL: <https://cenef-xxi.ru/articles/issledovanie-cenef-xxi-%22cbam.-posledstviya-dlya-rossijskoj-ekonomiki%22>

Существуют национальные и отраслевые рекомендации по определению углеродного следа продукции, которые разрабатываются также с учетом вышеприведенных стандартов ISO 14064 и ISO 14040/44.

К отраслевым рекомендациям относятся рекомендации: 1) EUROFER для черных металлов; 2) Fertilizers Europe для удобрений; 3) European Aluminum Association для алюминия; 4) European Cement Association для цемента.

Что касается национальных рекомендаций, в ЕС действует документ, определяющий принципы и порядок определения углеродного следа продукции¹, на основании которого рассчитаны удельные показатели углеродоемкости 10% лучших с точки зрения установок ЕС (бенчмарки) для 54 товаров², которые затем используется для расчета величины бесплатно выдаваемых квот на выбросы ПГ.

При этом следует отметить, что при расчете углеродного следа в данном случае используются в основном прямые выбросы ПГ, и только для алюминия и электростали используются значения прямых и косвенных эмиссий.

В России действуют Методика количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, Приказ Минприроды РФ от 27 мая 2022 г. № 371 (далее – Методика)³.

¹ Commission Delegated Regulation (EU) 2019/331 of 19 December 2018 determining transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.

² Commission Implementing Regulation (EU) 2021/447 of 12 March 2021 determining revised benchmark values for free allocation of emission allowances for the period from 2021 to 2025 pursuant to Article 10a (2) of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council // Official Journal of the European Union L 87/29.

³ Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов //

Основные принципы учета выбросов ПГ предприятия согласно Методике:

1. В границы количественного определения выбросов включаются прямые выбросы ПГ, которые происходят непосредственно от объектов организации и осуществляемых процессов.

2. Несущественные источники выбросов ПГ предприятия, которые составляют менее 5% в год от суммарных выбросов в организации, но не более 50 тыс т. CO₂-экв. в год, могут быть исключены из рассмотрения.

3. Методы, которые используются для количественного определения выбросов ПГ, включают в себя:

– метод расчета на основе данных о деятельности и коэффициентов выбросов;

– метод расчета на основе материально-сырьевого баланса;

– метод расчета на основе периодических измерений выбросов парниковых газов;

– метод непрерывного мониторинга выбросов парниковых газов.

4. При отсутствии необходимых данных для количественного определения выбросов ПГ могут использоваться справочные данные из других источников информации с обязательной ссылкой на источники информации.

Для металлургических предприятий в границы определения выбросов ПГ входят следующие процессы: 1) производство кокса; 2) производство агломерата; 3) производство железорудных окатышей; 4) производство железа прямого восстановления; 5) производство чугуна; 6) производство кислородно-конвертерной и мартеновской стали; 7) производство электростали; 8) производство стального проката.

Количественное определение выбросов ПГ для предприятий черной

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 года № 371. URL: <https://docs.cntd.ru/document/350962750?marker=65201M>

металлургии, согласно Методике, может осуществляться с использованием двух равнозначных методических подходов.

Первый подход предполагает расчет выбросов ПГ для каждого металлургического процесса в отдельности на основе углеродного баланса предприятия, с использованием данных о расходе углеродосодержащего сырья, материалов, восстановителя, топлива на производство металлургической продукции и удельного содержания углерода в них.

Второй подход предлагает определять выбросы ПГ от металлургических процессов и иных источников предприятия в совокупности на основе данных о движении углеродосодержащих ресурсов на производство металлургической продукции (с учетом изменения запасов) и удельного содержания углерода в них. И именно данный подход предлагается использовать в ГОСТ Р 113.26.01–2022. Под бенчмарками здесь понимается количественная оценка удельных выбросов парниковых газов, которая измеряется в тоннах CO₂-экв. на единицу производственной деятельности¹.

Другими словами, бенчмарки являются индикативными показателями углеродной эффективности производственных процессов, которые, с одной стороны, позволяют сравнивать предприятия отрасли между собой и с другими мировыми производителями (данные о мировых производителях продукции черной металлургии приводятся в докладах The World Steel Association² и The International Energy Agency³).

¹ ГОСТ Р 113.00.11–2022. Наилучшие доступные технологии. Порядок проведения бенчмаркинга удельных выбросов парниковых газов в отраслях промышленности.

² WSA. Steel Statistical Yearbooks 2020s. URL: <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/>

³ Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking, International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

С другой стороны, бенчмарки по удельным выбросам ПГ могут служить инструментом государственной промышленной политики: их включают в справочники по НДТ, что описано в работе Доброхотовой и Матушанского [28]. Также они применяются как один из критериев оценки инвестиционных проектов модернизации в рамках оказания мер государственной поддержки: такого рода предложения описаны в работах Волосатовой и др. [29], Скобелева и Ученова [30].

2.4. Оценка методических подходов к определению углеродного следа

Особенностью методического подхода, используемого в ГОСТ Р 113.26.01–2022, является то, что в нем предлагается учитывать как прямые, так и косвенные выбросы ПГ. Совокупные удельные выбросы ПГ для каждого технологического процесса включают в себя: 1) прямые выбросы в границах производственного процесса (передела) без учета вторичных топливных газов; 2) выбросы, связанные с электроэнергией; 3) выбросы, связанные с тепловой энергией; 4) выбросы, связанные с техническими газами и дутьем.

Вероятно, применение такого подхода обусловлено тем, что в этом случае возможно получение сопоставимых показателей удельных выбросов ПГ для сравнения с ведущими мировыми производителями: в оценках удельной углеродоемкости WSA и IEA используется тот же подход. Различные подходы к определению бенчмарков в черной металлургии описаны в работе Башмакова и др. [31]. Включение в расчеты косвенных выбросов ПГ от потребления тепловой и электрической энергии стимулирует осуществление энергосберегающих проектов на самом предприятии.

Расчеты удельных прямых выбросов ПГ в ГОСТ Р 113.26.01–2022 строятся на данных об удельных объемах

использования углеродсодержащих ресурсов в границах производственного процесса и содержания углерода в них.

Удельные выбросы ПГ, связанные с электроэнергией, рассчитываются с использованием данных об удельном потреблении электроэнергии в границах производственного процесса (передела), об удельной выработке электроэнергии на источнике, находящемся в границах производственного процесса (передела) и коэффициента выбросов ПГ для электроэнергии.

Расчет удельных выбросов ПГ, связанных с тепловой энергией, выполняется с использованием информации об удельном потреблении тепловой энергии (в паре и горячей воде) в границах производственного процесса (передела), об удельной выработке тепловой энергии (в паре и горячей воде) в границах производственного процесса (передела) и коэффициента выбросов ПГ для тепловой энергии.

Расчет удельных выбросов ПГ, связанных с техническими газами и дутьем, выполняется с использованием информации об удельном потреблении соответствующего технического газа (кислород, азот, аргон), доменного дутья в границах производственного процесса (передела) и коэффициента выброса ПГ для соответствующего технического газа, доменного дутья.

Использование предлагаемых Методикой и ГОСТ Р 113.26.01–2022 подходов требует детальной информации о движении сырья, материалов, энергетических ресурсов на предприятии. Данная работа для российских металлургических предприятий описана в ИТС 26–2022 «Производство чугуна, стали и ферросплавов» (Приложение Д. Индикативные показатели удельных выбросов парниковых газов)¹.

3. Методология исследования

3.1. Данные

В настоящей статье авторы опираются на данные, собранные и обработанные в процессе обновления справочника ИТС 26–2022 «Производство чугуна, стали и ферросплавов» коллективом авторов под руководством Минпромторга России. Для расчета индикативных показателей удельных выбросов ПГ использовались данные по годовому объему производства и потребленным ресурсам по 30 предприятиям отрасли черной металлургии, являющихся крупнейшими производителями металлургической продукции в Российской Федерации и обеспечивающих порядка 98 % производства чугуна и 90 % стали и проката.

Данные были собраны в ходе анкетирования с использованием унифицированного шаблона отраслевой анкеты за период 2017–2020 гг. Учитывались прямые выбросы CO₂ от производственного процесса (передела), а также косвенные выбросы, связанные с производством электрической и тепловой энергии, технических газов и дутья, используемых в производственном процессе (на переделе).

3.2. Методический подход

Применяемый методический подход основан на балансе выбросов ПГ, воплощенных в сырьевых продуктах, поступивших в процесс, и продуктов, полученных в процессе, которые могут быть сырьем для следующего металлургического передела. Средние значения углеродоемкости процессов металлургических производств для рассмотренных предприятий (CF_{mid}) представлены в табл. 1².

В то же время полученные от предприятий данные могут использоваться

¹ Актуализация Справочников НТД в 2022 году. URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/actualizationdirectory2022>

² Актуализация Справочников НТД в 2022 году. URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/actualizationdirectory2022>

Таблица 1. Значения индикативных показателей удельных выбросов ПГ для каждого технологического процесса металлургического предприятия
 Table 1. Values of specific GHG emissions for each technological process of a metallurgical enterprise

№ пп	Технологический процесс (передел)	Удельные выбросы ПГ, т CO ₂ -экв./т продукции передела		Наименование продукции передела
		CF_{mid}	CF_i	
1	Добыча железной руды и производство железорудных концентратов (справочно)	0,060	0,045	Железорудный концентрат
2	Производство кокса	0,440	0,117	Кокс
3	Производство агломерата	0,232	0,175	Агломерат
4	Производство железорудных окатышей	0,056	0,045	Железорудные окатыши
5	Производство чугуна в доменной печи	1,330	1,239	Чугун
6	Производство железа прямого восстановления	0,550	0,544	Железо прямого восстановления
7	Производство стали в конвертерах	0,230	0,203	Сталь
8	Производство стали в электродуговых печах (ЭДП)	0,410	0,258	Сталь
9	Горячий прокат и обработка (в т. ч. бесшовные трубы, катанка, сортовой прокат)	0,260	0,080	Стальной прокат

для определения целевых значений углеродоемкости продукции (CF_j), которые, в свою очередь, могут выступать параметрами управляющего воздействия для установления отраслевых показателей снижения выбросов парниковых газов и предоставления мер государственной поддержки предприятий.

Целевые значения углеродоемкости продукции предлагается определять как значения 10% лучших установок в РФ в разрезе технологических процессов.

Для общей оценки углеродного следа производимой в Свердловской области металлургической продукции предлагается использовать информацию об объемах производства продукции каждого вида, производственных

процессах каждого предприятия и значений удельных выбросов ПГ для каждого процесса (бенчмарках) (см. табл. 1).

Удельные выбросы по различным маршрутам производства готовой продукции рассчитываются по формуле (1):

$$CF_{route,j} = (\sum CF_{mid}(CF_j) \times P_j) + CF_{mid,j}(CF_{t,j}), \quad (1)$$

где $CF_{route,j}$ – удельные выбросы ПГ по соответствующему маршруту производства j -готовой продукции, т CO₂-экв./т продукции предприятия; $CF_{mid}(CF_j)$ – средние (целевые) значения удельных выбросов ПГ для продукции i -передела, т CO₂-экв./т продукции; P_j – удельный

расход ресурса по i -му переделу на 1 тонну готовой продукции; $CF_{mid,j}$ ($CF_{t,j}$) – средние (целевые) значения удельных выбросов ПГ для j -готовой продукции, т CO_2 -экв./т продукции предприятия.

Удельные расходы ресурсов по таким видам готовой продукции, как

чугун, сталь сырая, прокат стальной представлены в табл. 2 [32, 33].

Тогда удельные выбросы ПГ для каждого маршрута производства готовой металлургической продукции, согласно формуле 1 и данным табл. 1 и 2, представлены в табл. 3.

Таблица 2. Удельные расходы ресурсов для производства металлургической продукции

Table 2. Specific consumption of resources for metallurgical products production

Наименование продукции передела	Наименование углеродосодержащего ресурса	Удельный расход на 1 т, тонны (P_i)
Чугун	Агломерат	1,6
	Кокс	0,36
Сталь (доменная печь – конвертор)	Чугун	0,795
	Стальной лом	0,265
Сталь (доменная печь – ЭДП)	Чугун	0,18
	Стальной лом	0,91
Стальной прокат	Сталь	1,164

Таблица 3. Удельные выбросы ПГ по маршрутам производства готовой металлургической продукции

Table 3. Specific GHG emissions along the routes of finished metallurgical products production

Наименование готовой металлургической продукции	Маршрут производства	Удельные выбросы ПГ, т CO_2 -экв./т готовой продукции предприятия ($E_{CO_2-экв}$)	
		CF_{mid} (среднее значение)	CF_i (целевое значение)
Чугун	доменная печь	1,860	1,560
Сталь	доменная печь – конвертор	1,709	1,440
Сталь	доменная печь – ЭДП	0,745	0,534
Сталь	лом – ЭДП	0,410	0,258
Стальной прокат	доменная печь – конвертор – прокат	2,249	1,760
Стальной прокат	доменная печь – ЭДП – прокат	1,127	0,702
Стальной прокат	лом – ЭДП – прокат	0,740	0,380

Таблица 4. Информация о металлургических предприятиях Свердловской области

Table 4. Information about the metallurgical enterprises of the Sverdlovsk region

Название предприятия	Описание технологических процессов
АО «НЛМК-УРАЛ»	Электросталеплавильное производство, сырьем служит металлолом. Готовая продукция – стальной прокат (квадратная заготовка, арматура, катанка)
АО «ПЕРВОУРАЛЬСКИЙ НОВОТРУБНЫЙ ЗАВОД»	Электросталеплавильное производство, сырьем служит металлолом. Готовая продукция – стальные трубы и баллоны для предприятий нефте- и газодобывающей промышленности, топливно-энергетического комплекса, машиностроения, электротехнической промышленности, промышленного и гражданского строительства
ОАО «УРАЛЬСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД»	Производство электросварных прямошовных труб из рулонной стали. Сырье для производства труб закупается на стороне
ООО «НЛМК-МЕТИЗ»	Электросталеплавильное производство, сырьем служит металлолом. Готовая продукция – стальной прокат (проволока, гвозди, метизы)
ПАО «НАДЕЖДИНСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»	Предприятие полного металлургического цикла с собственной сырьевой базой. Имеет в своем составе агломерационный, доменный, электросталеплавильный (дуговая сталеплавильная электропечь), крупносортовый, сортопрокатный, калибровочный цеха и другие вспомогательные подразделения. Готовая продукция – стальной прокат
АО «ЕВРАЗ НИЖНЕТАГИЛЬСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»	Предприятие полного металлургического цикла с собственной сырьевой базой. Готовая продукция – ванадиевый чугун, ванадиевый шлак, металлопрокат. В состав предприятия входят горнорудное, агломерационное, коксохимическое, огнеупорное, доменное, сталеплавильное, прокатное, кислородное производства

3.3. Предприятия для оценки

Для оценки углеродного следа металлургических предприятий Свердловской области были выбраны предприятия, приведенные в табл. 4.

4. Результаты исследования

На основании открытых данных была собрана информация о производстве готовой продукции на каждом предприятии за 2021 г. Затем с использованием информации об удельных выбросах ПГ по маршрутам производства готовой

продукции из данных табл. 3 и данным об объемах производства были получены значения углеродного следа каждого предприятия и металлургического сектора Свердловской области в целом (табл. 5).

Графически полученные результаты представлены на рис. 4.

Расчеты на основании усредненных показателей углеродоемкости продукции российских металлургических предприятий показали, что совокупный углеродный след металлургического

Таблица 5. Углеродный след металлургических предприятий Свердловской области за 2021 г.

Table 5. Carbon footprint of metallurgical enterprises of the Sverdlovsk region for 2021

Название предприятия	Выпуск готовой продукции, тыс. т	Удельные выбросы ПГ, т CO ₂ -экв./т готовой продукции		Углеродный след (ср. знач.), тыс. т CO ₂ -экв.	Углеродный след (целев. знач.), тыс. т CO ₂ -экв.
		CF_{mid} (среднее значение)	CF_t (целевое значение)		
АО «НЛМК-УРАЛ» (лом – ЭДП – прокат)				2217,8	1138,9
Квадратная непрерывнолитая заготовка	1525,0	0,740	0,380	1128,5	579,5
Арматура	1004,0	0,740	0,380	743,0	381,5
Катанка	468,0	0,740	0,380	346,3	177,8
АО «ПЕРВОУРАЛЬСКИЙ НОВОТРУБНЫЙ ЗАВОД» (лом – ЭДП – прокат)				1887,0	969,0
Бесшовные трубы	1200,0	0,740	0,380	888,0	456,0
Сварные трубы	100,0	0,740	0,380	74,0	38,0
Трубные заготовки	1250,0	0,740	0,380	925,0	475,0
ОАО «УРАЛЬСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД» (прокат)				33,2	10,2
Свайная труба	16,7	0,260	0,080	4,3	1,3
Труба электросварная	94,9	0,260	0,080	24,7	7,6
Труба электросварная обсадная	16,1	0,260	0,080	4,2	1,3
ООО «НЛМК-МЕТИЗ» (лом – ЭДП – прокат)				225,3	115,7
Проволока	266,0	0,740	0,380	196,8	101,1
Крепежные изделия (саморезы)	8,0	0,740	0,380	5,9	3,0
Гвозди	30,4	0,740	0,380	22,5	11,6
ПАО «НАДЕЖДИНСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД» (доменная печь – ЭДП – прокат)				782,0	522,6
Чугун	88,5	1,860	1,560	164,6	138,1

Окончание табл. 5

Название предприятия	Выпуск готовой продукции, тыс. т	Удельные выбросы ПГ, т CO ₂ -экв./т готовой продукции		Углеродный след (ср. знач.), тыс. т CO ₂ -экв.	Углеродный след (цел. знач.), тыс. т CO ₂ -экв.
		CF_{mid} (среднее значение)	CF_t (целевое значение)		
Заготовка для переката	7,6	1,127	0,702	8,6	5,3
Заготовка осевая	111,3	1,127	0,702	125,4	78,1
Трубная заготовка	22,7	1,127	0,702	25,6	15,9
Прокат сортовой конструкционный	362,0	1,127	0,702	408,0	254,1
Прокат буровой пустотелый	0,2	1,127	0,702	0,2	0,1
Прокат сортовой холоднотянутый	19,0	1,127	0,702	21,4	13,3
Прокат со спец. отд. поверхности	2,0	1,127	0,702	2,3	1,4
Прочий сортовой прокат	23,0	1,127	0,702	25,9	16,1
АО «ЕВРАЗ НИЖНЕТАГИЛЬСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» (доменная печь – конвертер)				16633,6	13980,0
Чугун	4900,0	1,860	1,560	9114,0	7644,0
Сырая сталь	4400,0	1,709	1,440	7519,6	6336,0
ИТОГО				21778,8	16736,4

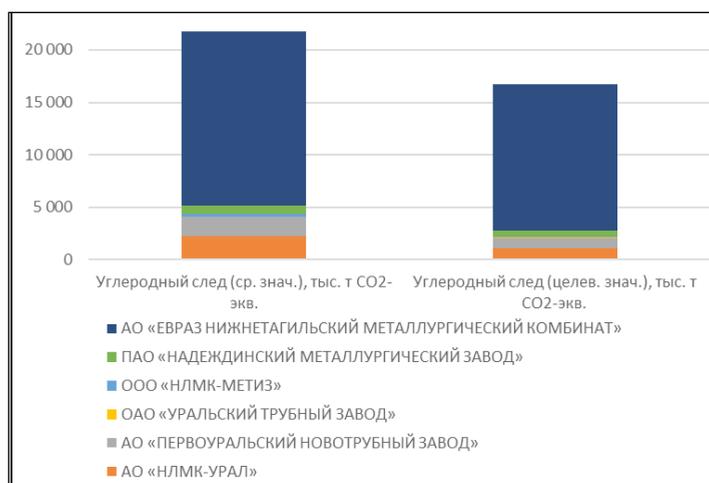


Рис. 4. Углеродный след металлургических предприятий Свердловской области за 2021 г.
 Figure 4. Carbon footprint of metallurgical enterprises of the Sverdlovsk region for 2021

сектора Свердловской области (с учетом прямых и косвенных эмиссий ПГ) по итогам 2021 г. при расчетах с использованием средних значений показателей углеродоемкости продукции составит 21,8 млн тонн CO_2 -экв.

При этом максимальный удельный вес в структуре выбросов ПГ занимают такие предприятия, как «Евраз-НТМК» (76 %), «НЛМК-Урал» (10 %) и ПНТЗ (8,7 %), что обусловлено большими объемами выпускаемой продукции, ее составом и применяемыми технологиями.

5. Обсуждение результатов

Следует отметить, что авторы статьи не располагают данными о материальных и энергетических балансах исследуемых предприятий. В этой связи использовались не фактические значения углеродоемкости продукции переделов, а усредненные оценки, полученные в рамках обследования 30 российских металлургических предприятий и приводимые в ИТС 26–2022 «Производство чугуна, стали и ферросплавов».

Использование схожего с авторами методического подхода к определению углеродоемкости в работах [22–27] дало сопоставимые значения по удельным выбросам ПГ различных переделов металлургического производства.

В Отчете о выполнении инвентаризации объемов выбросов и поглощения парниковых газов на территории Свердловской области, выполненном ЗАО «Углеметан Сервис» по контракту с Правительством Свердловской области в 2019 г., выбросы ПГ предприятиями черной металлургии Свердловской области по итогам 2017 г. составили 17,4 млн тонн CO_2 -экв.

Методология МГЭИК по проведению национальных инвентаризаций выбросов ПГ не предусматривает учет косвенных эмиссий ПГ в секторе «Промышленные процессы»: выбросы ПГ от производства тепловой и электрической энергии, используемой

в промышленных процессах, учитываются в секторе «Энергетика».

Поскольку в статье выполнены расчеты совокупных выбросов ПГ металлургических предприятий с учетом выбросов ПГ на всех переделах металлургического производства и с учетом тепловой, электрической энергии, поступившей со стороны, можно считать полученные в статье результаты сопоставимыми с данными региональной инвентаризации. При этом в статье приводится более полная оценка эмиссий ПГ металлургического сектора, с учетом поступающей со стороны тепловой и электрической энергии.

Гипотезой исследования являлось обоснование возможности использования целевых значений углеродного следа продукции для прогнозных оценок выбросов парниковых газов с учетом процессов декарбонизации отрасли.

Проведенные расчеты показали, что, если бы металлургические предприятия Свердловской области имели удельные значения показателей углеродоемкости выпускаемой продукции на уровне 10 % лучших установок России, совокупные выбросы парниковых газов от металлургического сектора в регионе составили бы 16,7 млн тонн CO_2 -экв., что на 23,4 % ниже, чем значения, рассчитанные по показателям средней углеродоемкости.

Таким образом, гипотеза исследования находит подтверждение. Действительно, целевые значения удельных выбросов могут использоваться в качестве управляющих параметров для прогнозирования отраслевых эмиссий парниковых газов с учетом декарбонизации отрасли и для установления показателей снижения выбросов парниковых газов.

При этом очевидно, что российские металлургические предприятия не являются самыми передовыми с точки зрения применяемых технологий. В дорожной карте по декарбонизации

различных секторов в соответствии с целями Парижского соглашения¹, а также во многих работах российских авторов (см. Galitskaya & Zhdaneev O. [34]; Башмаков [35], Плещенко [36]) содержатся различные перспективные мероприятия, направленные на снижение углеродного следа металлургического сектора.

Выделим следующие перспективные мероприятия.

1. Повышение доли стали, выплавленной в электродуговых печах. Снижение углеродного следа обусловлено в данном случае использованием металлического лома в качестве основного сырья. Использование лома позволяет избежать выбросов ПГ на переделах,

связанных с выплавкой стали, поэтому необходимо стимулировать заготовку лома, создавая соответствующие инструменты и инфраструктуру, что рассматривается в работе Тихоновской [37].

2. Повышение доли металлургического лома и горячебрикетированного железа в шихте.

3. Утилизация доменного газа и его использование для получения тепловой и электрической энергии.

4. Использование конверторного газа для производства электроэнергии и тепла.

5. Безкоксовые технологии производства железа, включая получение железа прямого восстановления (HyL-3, Midrex, COREX, Ромелт), замена углерода на водород при восстановлении железа.

В табл. 6 представлены сопоставимые с точки зрения методологии результаты расчетов углеродного следа для некоторых перспективных технологий производства стали.

Таблица 6. Показатели углеродоемкости перспективных технологий производства стали

Table 6. Carbon footprint of perspective metallurgical technologies

Название технологии	Углеродный след, т CO ₂ -экв./т проката	Источник
Получение железа прямого восстановления с использованием природного газа и э/э, полученной из возобновляемых источников	1,40	Suer et al. [38]
Получение железа прямого восстановления с использованием природного газа и э/э, полученной из сети	1,70	
Получение железа прямого восстановления с использованием водорода и э/э, полученной из возобновляемых источников	0,76	
Получение железа прямого восстановления с использованием водорода и э/э, полученной из сети	2,3–3,0	Smith M. P. [39]
Вдувание природного газа в доменную печь	1,63	
Вдувание водорода в доменную печь	1,40	Chisalita D. A. et al. [25]
Маршрут доменная печь – конвертор с применением технологий улавливания и хранения CO ₂	0,89–0,41	
Использование горячебрикетированного железа (ГБЖ) в доменной печи	1,35	Yilmaz C., Turek T. [40]

Дальнейшим направлением исследования может являться оценка возможности реализации указанных мероприятий на металлургических предприятиях Свердловской области и прогнозирования изменения совокупных выбросов парниковых газов сектора в этой связи.

Также перспективно использование углеродного следа продукции как критерия отбора проектов для «зеленого финансирования» за счет средств государства и частных инвесторов. Особенности такого финансирования, включая научно-обоснованную систему критериев, одним из которых выступает углеродный след продукции, рассмотрены в работе Скобелева и Волосатовой [41].

6. Выводы

В процессе формирования региональной политики декарбонизации неизменно встает вопрос о том, каким может быть перспективное снижение выбросов парниковых газов в той или иной отрасли. Авторы предлагают ответить на него с использованием информации о планируемых объемах производства продукции и целевых значений показателя «углеродный след продукции».

Данный показатель, в зависимости от целей и имеющихся у государства ресурсов по поддержке низкоуглеродного развития, может приниматься как на уровне 10% лучших установок

страны, так и на уровне значений передовых мировых низкоуглеродных технологий. Использование данного показателя вносит вклад в развитие методического подхода определения прогнозных значений выбросов парниковых газов.

Другим важным методическим аспектом, рассмотренным в статье, является систематизация имеющихся зарубежных и отечественных подходов к оценке текущего и перспективного углеродного следа продукции металлургических предприятий в зависимости от маршрутов производства стали.

Разработка стандартов оценки выбросов парниковых газов на уровне предприятия, регулярное проведение такой оценки и ее подтверждение независимой организацией (верификация) является подготовительным этапом, дающим возможность запуска механизма торговли квотами на выбросы парниковых газов на уровне региона или страны.

Предлагаемый авторами в настоящей статье методический подход к определению текущего и перспективного углеродного следа предприятий черной металлургии может использоваться лицами, принимающими решения, для формирования региональной политики декарбонизации в части установления целевых отраслевых значений выбросов парниковых газов и соответствующих механизмов поддержки.

Список использованных источников

1. *Chen L., Msigwa G., Yang M., Osman A.I., Fawzy S., Rooney D.W., Yap P.-S.* Strategies to achieve a carbon neutral society: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2022. Vol. 20. Pp. 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
2. *Белик И.С., Стародубец Н.В., Майорова Т.В., Ячменева А.И.* Стимулирование перехода к низкоуглеродной экономике. М.: ИНФРА-М, 2018. 104 с. https://doi.org/10.12737/monography_5b4465f5655254.86893595
3. *Ji C.J., Hu Y.J., Tang B.J.* Research on carbon market price mechanism and influencing factors: a literature review // *Natural Hazards*. 2018. Vol. 92, Issue 2. Pp. 761–782. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3223-1>
4. *Makholm J.D.* Regulation of natural gas in the United States, Canada and Europe // *Prospects for a Low Carbon Fuel*. 2015. Vol. 9, No. 1. Pp. 107–127. <http://dx.doi.org/10.1093/reep/reu017>
5. *Стародубец Н.В., Грищенко Ю.О., Белик И.С., Никулина Н.Л.* Экономическая оценка последствий введения трансграничного углеродного регулирования для

регионального промышленного комплекса (на примере Свердловской области) // Journal of Applied Economic Research. 2022. Т. 21, № 4. С. 708–733. <http://dx.doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.4.025>

6. *Belik I.S., Starodubets N.V., Yachmeneva A.I., Prokopov K.A.* Border Carbon Adjustment: Implications for Russian Companies and Regions in the Context of the Russia Sanctions (the Case of Magnitogorsk Iron and Steel Works and Chelyabinsk Region) // R-Economy. 2022. Vol. 8, No. 3. Pp. 252–267. <https://doi.org/10.15826/recon.2022.8.3.020>

7. *Doda B., Kuneman W.A.E., Krause E., Boute A., Jackson E.* Carbon pricing potential in East and South Asia. Interim Report // CLIMATE CHANGE. 2021. No. 40. Germany: Adelphi Research Gemeinnützige GmbH, 2021. 65 p. URL: <https://www.adelphi.de/en/publication/carbon-pricing-potential-east-and-south-asia>

8. *Bolay A.F., Bjørn A., Weber O., Margini M.* Prospective sectoral GHG benchmarks based on corporate climate mitigation targets // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 376. P. 134220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134220>

9. *Bailey I.* The EU emissions trading scheme // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. 2010. Vol. 1, Issue 1. Pp. 144–153. <https://doi.org/10.1002/wcc.17>

10. *Randall A.* The Problem of Market Failure // Natural Resources Journal. 1983. Vol. 23, No. 1. Pp. 131–148. URL: <http://www.jstor.org/stable/24882453>

11. *Coase R.H.* The Problem of Social Cost // Classic Papers in Natural Resource Economics / edited by C. Gopalakrishnan. London: Palgrave Macmillan, 1960. Pp. 87–137. https://doi.org/10.1057/9780230523210_6

12. *Данилов-Данильян В.И.* Теорема Коуза: попытка диагноза // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82, № 9. С. 814–822. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17906851>

13. *Pigou A.* The Economics of Welfare. Macmillan, 1920. <https://doi.org/10.4324/9781351304368>

14. *Zhang Y.J., Wei Y.M.* An overview of current research on EU ETS: Evidence from its operating mechanism and economic effect // Applied Energy. 2010. Vol. 87, Issue 6. Pp. 1804–1814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.019>

15. *Convery F.J.* Origins and Development of the EU ETS // Environmental and Resource Economics. 2009. Vol. 43, Issue 3. Pp. 391–412. <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9275-7>

16. *Quemin S.* Raising climate ambition in emissions trading systems: The case of the EU ETS and the 2021 review // Resource and Energy Economics. 2022. Vol. 68. P. 101300. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101300>

17. *Sato M., Rafaty R., Cael R., Grubb M.* Allocation, allocation, allocation! The political economy of the development of the European Union Emissions Trading System // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. 2022. Vol. 13, Issue 5. P. e796. <https://doi.org/10.1002/wcc.796>

18. *Somers J.* Technologies to Decarbonise the EU Steel Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. <https://doi.org/10.2760/069150>

19. *Perino G., Willner M.* EU-ETS Phase IV: allowance prices, design choices and the market stability reserve // Climate Policy. 2017. Vol. 17, Issue 7. Pp. 936–946. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1360173>

20. *Симонян Л.М.* Анализ методологии определения выбросов CO₂ на территории РФ применительно к черной металлургии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61, №9. С. 721–730. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-721-730>

21. *Gao T., Liu Q., Wang J.* A comparative study of carbon footprint and assessment standards // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2014. Vol. 9, Issue 3. Pp. 237–243. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt041>

22. *Renzulli P.A., Notarnicola B., Tassielli G., Arcese G., Capua R.D.* Life Cycle Assessment of Steel Produced in an Italian Integrated Steel Mill // Sustainability. 2016. Vol. 8, Issue 8. P. 719. <https://doi.org/10.3390/su8080719>

23. *Norgate T.E., Jahanshahi S., Rankin W.J.* Assessing the environmental impact of metal production processes // *Journal of Cleaner Production*. 2007. Vol. 15, Issue 8-9. Pp. 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
24. *Burchart-Korol D.* Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 54. Pp. 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>
25. *Chisalita D.A., Petrescu L., Cobden P., Dijk van H.E., Cormos A.M., Cormos C.-C.* Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 211. Pp. 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.256>
26. *Backes J.G., Suer J., Pauliks N., Neugebauer S., Traverso M.* Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: actual environmental profile // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Issue 6. P. 3443. <https://doi.org/10.3390/su13063443>
27. *Лисуенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лантева А.В.* Использование триады доменная печь, кислородный конвертер, электродуговая печь для уменьшения углеродного следа // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60, № 8. С. 623–628. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-8-623-628>
28. *Доброхотова М.В., Матушанский А.В.* Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // *Экономика устойчивого развития*. 2022. № 2 (50). С. 63–68. https://doi.org/10.37124/20799136_2022_2_50_63
29. *Волосатова А.А., Пятница А.А., Гусева Т.В., Almgren R.* Наилучшие доступные технологии как универсальный инструмент совершенствования государственных политик // *Экономика устойчивого развития*. 2021. № 4 (48). С. 17–23. https://doi.org/10.37124/20799136_2021_4_48_17
30. *Скобелев Д.О., Ученое А.А.* Потенциал применения концепции наилучших доступных технологий для принятия решений о государственной поддержке реального сектора российской экономики в условиях глобального энергоперехода // *Экономика устойчивого развития*. 2021. № 4 (48). С. 168–179. https://doi.org/10.37124/20799136_2021_4_48_168
31. *Башмаков И.А., Скобелев Д.О., Борисов К.Б., Гусева Т.В.* Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77, № 9. С. 1071–1086. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086>
32. *Tsuchiya H.* The global resource balance table, an integrated table of energy, materials and the environment // *Energy Policy*. 2013. Vol. 61. Pp. 1107–1110. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.114>
33. *Измайлова А.С., Шаповалов А.Н.* Технологические возможности сокращения себестоимости продукции металлургических предприятий на современном этапе // *Тренды и управление*. 2017. № 2. С. 132–147. <https://doi.org/10.7256/2454-0730.2017.2.23040>
34. *Galitskaya E., Zhdaneev O.* Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation // *Environmental Technology & Innovation*. 2022. Vol. 27. P. 102517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102517>
35. *Башмаков И.А.* Выбросы парниковых газов от мировой черной металлургии: прошлое, настоящее и будущее // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77, № 8. С. 882–901. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-882-901>
36. *Плещенко В.И.* Перспективы перехода предприятий черной металлургии России к использованию безуглеродных технологий // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77, № 8. С. 913–917. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-913-917>

37. Тихоновская И.Д. Методический подход к управлению системой обеспечения металлургических предприятий ломом черных металлов // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. 2016. Т. 15, № 5. С. 673–695. <http://dx.doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.5.34>

38. Suer J., Ahrenhold F., Traverso M. Carbon Footprint and Energy Transformation Analysis of Steel Produced via a Direct Reduction Plant with an Integrated Electric Melting Unit // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. Vol. 8, No. 4. Pp. 1532–1545. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00585-x>

39. Smith M.P. Blast Furnace Ironmaking – A View on Future Developments // Procedia Engineering. 2017. Vol. 174. Pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.133>

40. Yilmaz C., Wendelstorf J., Turek T. Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 164. Pp. 1519–1530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.162>

41. Скобелев Д.О., Волосатова А.А. Разработка научного обоснования системы критериев «зеленого» финансирования проектов, направленных на технологическое обновление российской промышленности // Экономика устойчивого развития. 2021. № 1 (45). С. 181–188. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44928673>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стародубец Наталья Владимировна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры экономической безопасности производственных комплексов Института экономики и управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8687-2050> e-mail: n.v.starodubets@gmail.com

Белик Ирина Степановна

Доктор экономических наук, профессор кафедры экономической безопасности производственных комплексов Института экономики и управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7405-3226> e-mail: irinabelik2010@mail.ru

Никulina Наталья Леонидовна

Кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Института экономики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия (620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6882-3172> e-mail: nikulina.nl@uiec.ru

Аликберова Тамила Тагировна

Ассистент кафедры финансового и налогового менеджмента Института экономики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия (620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7382-0980> e-mail: tamila.alikberova@urfu.ru

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность фонду РНФ и Правительству Свердловской области: исследование выполнено в рамках гранта РНФ и правительства Свердловской области (проект №22-28-20453 «Комплексный подход к процессам декарбонизации экономики: формирование региональной политики»).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Стародубец Н.В., Белик И.С., Никулина Н.Л., Аликберова Т.Г. Оценка и прогнозирование углеродного следа металлургических предприятий Свердловской области // Journal of Applied Economic Research. 2023. Т. 22, № 3. С. 572–599. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.3.024>

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 14 июня 2023 г.; дата поступления после рецензирования 29 июля 2023 г.; дата принятия к печати 18 августа 2023 г.

Assessment and Forecasting of Metallurgical Enterprises Carbon Footprint in the Sverdlovsk Region

Natalia V. Starodubets¹  , Irina S. Belik¹ , Natalia L. Nikulina² ,
Tamila T. Alikberova¹ 

¹ Ural Federal University

named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

² Institute of Economics, The Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

 n.v.starodubets@gmail.com

Abstract. The achievement of the targets of reducing greenhouse gas emissions is ensured, among other things, through direct price regulation measures, for the implementation of which a necessary condition is the calculation of the carbon footprint of products. At the same time, carbon footprint targets can be used as driving parameters to set industry targets for reducing greenhouse gas emissions, as well as to provide government support measures for enterprises. The aim of the work is to develop a methodological approach to the use of the «carbon footprint of products» indicator as a parameter for assessing the current and forecast values of greenhouse gas emissions from enterprises in industries that are subject to carbon regulation. The hypothesis of the study is to justify the use of target values of the indicator «carbon footprint of products» for strategic estimates of greenhouse gas emissions in the process of industrial decarbonization. For this purpose, the paper considers the organizational and economic mechanism of the European emissions trading system. A methodical approach to determining the carbon footprint of metallurgical products is described, and calculations of the carbon footprint of metallurgical enterprises in the Sverdlovsk region are performed. Calculations based on average indicators of the carbon intensity of products of Russian metallurgical enterprises showed that the total carbon footprint of the metallurgical sector of the Sverdlovsk region in 2021 is 21.8 million tons of CO₂-eq; its target value may be 16.7 million tons of CO₂-eq. Differences in values are due to the existing structure of manufactured products and applied technologies. The development of standard metrics for assessing greenhouse gas emissions at the enterprise level, regularly conducting such an assessment and its verification by an independent organization may constitute a preparatory stage that makes it possible to launch a mechanism for trading greenhouse gas emissions at the regional or country level. Additionally, the carbon footprint of products can act as a control parameter while establishing quantitative values for the volume of greenhouse gas emission reductions. The proposed methodological approach can be used by decision makers to shape regional decarbonization policies.

Key words: emissions trading; carbon intensity of products; GHG accounting; carbon regulation tools; GHG emissions in metallurgy; benchmarking; best available technologies; industrial decarbonization.

JEL Q510

References

1. Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A.I., Fawzy, S., Rooney, D.W., Yap, P.-S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 20, 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>

2. Belik, I.S., Starodubets, N.V., Mayorova, T.V., Iachmeneva, A.I. (2018). *Stimulirovanie perekhoda k nizkouglerodnoi ekonomike (Encouraging a transition to a low-carbon economy)*. Moscow, INFRA-M. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/monography_5b4465f5655254.86893595
3. Ji, C.J., Hu, Y.J., Tang, B.J. (2018). Research on carbon market price mechanism and influencing factors: a literature review. *Natural Hazards*, Vol. 92, Issue 2, 761–782. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3223-1>
4. Makhholm, J.D. (2015). Regulation of natural gas in the United States, Canada and Europe. *Prospects for a Low Carbon Fuel*, Vol. 9, No. 1, 107–127. <http://dx.doi.org/10.1093/reep/reu017>
5. Starodubets, N.V., Grishchenko, Iu.O., Belik, I.S., Nikulina, N.L. (2022). Ekonomicheskaya otsenka posledstviy vvedeniya transgranichnogo uglerodnogo regulirovaniya dlya regionalnogo promyshlennogo kompleksa (na primere Sverdlovskoi oblasti) (Economic Assessment of the Consequences of the Carbon Border Adjustment Mechanism Introduction for the Regional Industrial Complex (on the Example of the Sverdlovsk Region)). *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 21, No. 4, 708–733. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.4.025>
6. Belik, I.S., Starodubets, N.V., Yachmeneva, A.I., Prokopov, K.A. (2022). Border Carbon Adjustment: Implications for Russian Companies and Regions in the Context of the Russia Sanctions (the Case of Magnitogorsk Iron and Steel Works and Chelyabinsk Region). *R-Economy*, Vol. 8, No. 3, 252–267. <https://doi.org/10.15826/recon.2022.8.3.020>
7. Doda, B., Kuneman, W.A.E., Krause, E., Boute, A., Jackson, E. (2021). Carbon pricing potential in East and South Asia. Interim Report. *CLIMATE CHANGE*, 2021, No. 40. Germany, Adelphi Research Gemeinnützige GmbH, 65 p. Available at: <https://www.adelphi.de/en/publication/carbon-pricing-potential-east-and-south-asia>
8. Bolay, A.F., Bjørn, A., Weber, O., Margini, M. (2022). Prospective sectoral GHG benchmarks based on corporate climate mitigation targets. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 376, 134220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134220>
9. Bailey, I. (2010). The EU emissions trading scheme. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 1, Issue 1, 144–153. <https://doi.org/10.1002/wcc.17>
10. Randall, A. (1983). The Problem of Market Failure. *Natural Resources Journal*, Vol. 23, No. 1, 131–148. Available at: <http://www.jstor.org/stable/24882453>
11. Coase, R.H. (1960). The Problem of Social Cost. In: *Classic Papers in Natural Resource Economics*. Edited by C. Gopalakrishnan. London, Palgrave Macmillan, 87–137. https://doi.org/10.1057/9780230523210_6
12. Danilov-Danilyan, V.I. (2012). Teorema Kouza: popytka diagnoza (Coase's Theorem: an attempted diagnosis). *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk (Herald of the Russian Academy of Sciences)*, Vol. 82, No. 9, 814–822. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17906851>
13. Pigou, A. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan. <https://doi.org/10.4324/9781351304368>
14. Zhang, Y.J., Wei, Y.M. (2010). An overview of current research on EU ETS: Evidence from its operating mechanism and economic effect. *Applied Energy*, Vol. 87, Issue 6, 1804–1814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.019>
15. Convery, F.J. (2009). Origins and Development of the EU ETS. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 43, Issue 3, 391–412. <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9275-7>
16. Quemin, S. (2022). Raising climate ambition in emissions trading systems: The case of the EU ETS and the 2021 review. *Resource and Energy Economics*, Vol. 68, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101300>
17. Sato, M., Rafaty, R., Calel, R., Grubb, M. (2022). Allocation, allocation, allocation! The political economy of the development of the European Union Emissions Trading System. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 13, Issue 5, e796. <https://doi.org/10.1002/wcc.796>
18. Somers, J. (2022). *Technologies to Decarbonise the EU Steel Industry*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/069150>

19. Perino, G., Willner, M. (2017). EU-ETS Phase IV: allowance prices, design choices and the market stability reserve. *Climate Policy*, Vol. 17, Issue 7, 936–946. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1360173>
20. Simonian, L.M. (2018). Analiz metodologii opredeleniia vybrosov SO₂ na territorii RF primenitelno k chernoi metallurgii (Analysis of the methodology for determining CO₂ emissions on the territory of the Russian Federation in respect to the ferrous metallurgy). *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgii (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*, Vol. 61, No. 9, 721–730. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-721-730>
21. Gao, T., Liu, Q., Wang, J. (2014). A comparative study of carbon footprint and assessment standards. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 9, Issue 3, 237–243. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt041>
22. Renzulli, P.A., Notarnicola, B., Tassielli, G., Arcese, G., Capua, R.D. (2016). Life Cycle Assessment of Steel Produced in an Italian Integrated Steel Mill. *Sustainability*, Vol. 8, Issue 8, 719. <https://doi.org/10.3390/su8080719>
23. Norgate, T.E., Jahanshahi, S., Rankin, W.J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, Issue 8-9, 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
24. Burchart-Korol, D. (2013). Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 54, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>
25. Chisalita, D.A., Petrescu, L., Cobden, P., Dijk, van H.E., Cormos, A.M., Cormos, C.-C. (2019). Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 211, 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.256>
26. Backes, J.G., Suer, J., Pauliks, N., Neugebauer, S., Traverso, M. (2021). Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: actual environmental profile. *Sustainability*, Vol. 13, Issue 6, 3443. <https://doi.org/10.3390/su13063443>
27. Lisienko, V.G., Chesnokov, Iu.N., Lapteva, A.V. (2017). Ispolzovanie triady domennaia pech, kislorodnyi konverter, elektrodugovaia pech dlia umensheniia uglerodnogo sleda (The use of triad of blast furnace, oxygen converter and electric arc furnace for carbon footprint reduction). *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgii (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*, Vol. 60, No. 8, 623–628. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-8-623-628>
28. Dobrokhotova, M.V., Matushanskii, A.V. (2022). Primenenie kontseptsii nailuchshikh dostupnykh tekhnologii v tseliakh tekhnologicheskoi transformatsii promyshlennosti v usloviakh energeticheskogo perekhoda (Applying the best available techniques concept for the technological transformation of industry under the energy transition conditions). *Ekonomika ustoi-chivogo razvitiia (Economics of sustainable development)*, No. 2 (50), 63–68. (In Russ.). https://doi.org/10.37124/20799136_2022_2_50_63
29. Volosatova, A.A., Piatnitsa, A.A., Guseva, T.V., Almgren, R. (2021). Nailuchshie dostupnye tekhnologii kak universal'nyi instrument sovershenstvovaniia gosudarstvennykh politik (Best available techniques as a universal instrument for improving state policies). *Ekonomika ustoi-chivogo razvitiia Ekonomika ustoi-chivogo razvitiia (Economics of sustainable development)*, No. 4 (48), 17–23. (In Russ.). https://doi.org/10.37124/20799136_2021_4_48_17
30. Skobelev, D.O., Uchenov, A.A. (2021). Potentsial primeneniia kontseptsii nailuchshikh dostupnykh tekhnologii dlia priniatiia reshenii o gosudarstvennoi podderzhke realnogo sektora rossiiskoi ekonomiki v usloviakh global'nogo energoperekhoda (The potential of best available techniques for making decisions on the governmental support of the real economy sectors of the Russian Federation under the conditions of the global energy transition). *Ekonomika ustoi-chivogo razvitiia Ekonomika ustoi-chivogo razvitiia (Economics of sustainable development)*, No. 4 (48), 168–179. (In Russ.). https://doi.org/10.37124/20799136_2021_4_48_168

31. Bashmakov, I.A., Skobelev, D.O., Borisov, K.B., Guseva, T.V. (2021). Sistemy benchmarkinga po udelnym vybrosam parnikovyykh gazov v chernoii metallurgii (Benchmarking systems for greenhouse gases specific emissions in steel industry). *Chernaia metallurgii. Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii (Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information)*, Vol. 77, No. 9, 1071–1086. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086>
32. Tsuchiya, H. (2013). The global resource balance table, an integrated table of energy, materials and the environment. *Energy Policy*, Vol. 61, 1107–1110. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.114>
33. Izmailova, A.S., Shapovalov, A.N. (2017). Tekhnologicheskie vozmozhnosti sokrashcheniia sebestoimosti produktsii metallurgicheskikh predpriatii na sovremennom etape [Technological capacity for cutting the cost of production at metallurgical enterprises at the current stage]. *Trendy i upravlenie (Trends and Management)*, No. 2, 132–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2454-0730.2017.2.23040>
34. Galitskaya, E., Zhdaneev, O. (2022). Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, 102517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102517>
35. Bashmakov, I.A. (2021). Vybrosy parnikovyykh gazov ot mirovoi chernoii metallurgii: proshloe, nastoiashchee i budushchee (Greenhouse gas emissions caused by global steel industry: the past, the present and the future). *Chernaia metallurgii. Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii (Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information)*, Vol. 77, No. 8, 882–901. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-882-901>
36. Pleshchenko, V.I. (2021). Perspektivy perekhoda predpriatii chernoii metallurgii Rossii k ispolzovaniyu bezuglerodnykh tekhnologii (Prospects of transition of ferrous metallurgy enterprises of Russia to the use of carbon-free technologies.). *Chernaia metallurgii. Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii (Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information)*, Vol. 77, No. 8, 913–917. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-913-917>
37. Tikhonovskaia, I.D. (2016). Metodicheskii podkhod k upravleniiu sistemoi obespecheniia metallurgicheskikh predpriatii lomom chernyykh metallov (A methodical approach to the management of ferrous scrap supply system of metallurgical enterprises). *Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie (Bulletin of UrFU. Series Economics and Management)*, Vol. 15, No. 5, 673–695. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.5.34>
38. Suer, J., Ahrenhold, F., Traverso, M. (2022). Carbon Footprint and Energy Transformation Analysis of Steel Produced via a Direct Reduction Plant with an Integrated Electric Melting Unit. *Journal of Sustainable Metallurgy*, Vol. 8, No. 4, 1532–1545. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00585-x>
39. Smith, M.P. (2017). Blast Furnace Ironmaking – A View on Future Developments. *Procedia Engineering*, Vol. 174, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.133>
40. Yilmaz, C., Wendelstorf, J., Turek, T. (2017). Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 164, 1519–1530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.162>
41. Skobelev, D.O., Volosatova, A.A. (2021). Razrabotka nauchnogo obosnovaniia sistemy kriteriev «zelenogo» finansirovaniia proektov, napravlennykh na tekhnologicheskoe obnovlenie rossiiskoi promyshlennosti (Scientific rationale for the development of the “green” project financing criteria system designed to achieve technological restoration for the Russian industry). *Ekonomika ustoichivogo razvitiia (Economics of Sustainable Development)*, No. 1 (45), 181–188. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44928673>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Natalia Vladimirovna Starodubets

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Economic Safety of Industrial Complexes, School of Economics and Management, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, Mira street, 19); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8687-2050> e-mail: n.v.starodubets@gmail.com

Irina Stepanovna Belik

Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Economic Safety of Industrial Complexes, School of Economics and Management, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, Mira street, 19); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7405-3226> e-mail: irinabelik2010@mail.ru

Natalia Leonidovna Nikulina

Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher, Institute of Economics, The Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia (620014, Yekaterinburg, Moskovskaya street, 29); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6882-3172> e-mail: nikulina.nl@uiec.ru

Tamila Tagirovna Alikberova

Assistant, Department of Financial and Tax Management, School of Economics and Management, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, Mira street, 19); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7382-0980> e-mail: tamila.alikberova@urfu.ru

ACKNOWLEDGMENTS

We express our gratitude to the RSF and the Government of the Sverdlovsk Region: the study was carried out within the framework of a grant from the RSF and the Government of the Sverdlovsk Region (project No. 22-28-20453 «An integrated approach to the processes of economy decarbonization: the formation of regional policy»).

FOR CITATION

Starodubets, N.V., Belik, I.S., Nikulina, N.L., Alikberova, T.T. (2023). Assessment and Forecasting of Metallurgical Enterprises Carbon Footprint in the Sverdlovsk Region. *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 22, No. 3, 572–599. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.3.024>

ARTICLE INFO

Received June 14, 2023; Revised July 29, 2023; Accepted August 18, 2023.

