

УДК 551.583.2

Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS и пути сокращения выбросов на железнодорожном транспорте

Р. Г. Ахтямов, Е. И. Макарова, А. А. Гаврилова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ахтямов Р. Г., Макарова Е. И., Гаврилова А. А. Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS и пути сокращения выбросов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 694–705. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-694-705

Аннотация

Цель: Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS, а также путей сокращения выбросов на железнодорожном транспорте. **Методы:** Оценен вклад стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов на основе массива статистических данных за период с 1990 по 2019 год. Определена величина выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год, а также источники выбросов CO₂. **Результаты:** Наиболее эффективный способ смягчения последствий изменения климата — это прямое сокращение выбросов. В целом выбросы железнодорожной отрасли зависят от степени электрификации. Однако при оценке не только прямых, но и косвенных выбросов основное значение приобретает источник энергии и его углеродный след. Значимым является развитие интермодальных перевозок в странах BRICS, так как данные маршруты имеют потенциал снижения выбросов. Углеродное регулирование приводит к перераспределению в сфере международных грузовых перевозок стран BRICS. Конкурентные преимущества все больше проявляются у железнодорожного транспорта. Однако данный эффект зависит от того, какими будут мероприятия по адаптации к изменениям рынка перевозок со стороны других видов транспорта. **Практическая значимость:** Сформулированы пути повышения устойчивости транспортной инфраструктуры. Низкоуглеродная транспортная отрасль стран BRICS может являться существенным компонентом снижения валовых выбросов парниковых газов, особенно учитывая имеющуюся значительную зависимость от ископаемого углеродного топлива, а также некоторую инерцию, которая обусловлена длительным сроком службы имеющейся инфраструктуры, работающей на ископаемом топливе. Снижение выбросов парниковых газов от объектов железнодорожного транспорта стран BRICS может заключаться в реализации следующих мер: сокращение прямых выбросов; разработка и реализация технологий поглощения парниковых газов с учетом геопространственного распределения транспортных объектов и их специфики; привлечение инвестиций и обеспечение доступа к более дешевому финансированию данных проектов; интеграция вопросов смягчения последствий изменения климата в стратегии транспортных компаний; продолжение электрификации транспорта и перехода на альтернативные виды топлива; использование цифровых технологий для оптимизации транспортных систем в направлении сокращения влияния железнодорожной отрасли на окружающую среду.

Ключевые слова: Глобальное потепление, устойчивое развитие, железнодорожная отрасль, изменение климата, низкоуглеродная транспортная отрасль, выбросы углекислого газа, технологии поглощения выбросов.

Введение

Выбросы парниковых газов, в том числе углекислого газа, являются основной причиной глобальных климатических изменений. Для того чтобы избежать наиболее неблагоприятных последствий климатических изменений, следует сокращать общие валовые выбросы парниковых газов. Однако распределение ответственности за выбросы и мер по смягчению и адаптации к климатическим изменениям между регионами, странами, отраслями и отдельными лицами в настоящий момент является предметом анализа и широких дискуссий.

Так, центральной частью процесса развития, в соответствии с положениями Декларации ООН по проблемам окружающей среды (Стокгольм, 1972) и Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992), должно быть достижение устойчивого развития и реализация подходов по защите окружающей среды. При этом наличие значительной части как морально, так и физически устаревшего оборудования в некоторых отраслях оказывает существенное влияние на валовые выбросы парниковых газов [1].

Формирование и работа Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) явились результатом принятия и реализации Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Киото, 1997). Вместе с тем правительства отдельных государств разрабатываются меры более эффективного использования энергии, а также поддержка разработки и внедрения новых и (или) возобновляемых источников энергии и инновационных технологий, в том числе технологий поглощения парниковых газов, которые уже поступили в атмосферу [2–4].

По итогам Парижского соглашения по борьбе с изменением климата (КС-21) участники (197 стран) приняли на себя обязательства по разра-

ботке долгосрочной стратегии экономического развития при условии снижения выбросов парниковых газов. На сегодняшний день Парижское соглашение ратифицировано странами, общий вклад которых в валовые выбросы составляет 96,98 %, в том числе страны BRICS.

По итогам 26-й сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН (РКИК) об изменении климата (Глазго, 2021) согласована открытая повестка дня по рынкам углеродных единиц и отчетности. В том числе финансирование мероприятий по смягчению последствий климатических изменений, снижению выбросов, а также повышению устойчивости климатической системы. Кроме того, идет снижение доли устаревших технологий, применяемых в энергетическом секторе. Однако оценка мер по смягчению последствий климатических изменений показала имеющийся разрыв между существующими выбросами парниковых газов и величиной тех выбросов, которые необходимы для реализации Парижского соглашения [5–9]. Сторонами РКИК принят подход, заключающийся в стремлении сохранить возможность удержания прироста общемировой средней температуры в пределах 2 °C по отношению к доиндустриальному уровню [10–15].

Материалы и методы

Анализ вклада стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов проведен по материалам статистических данных [16] за различные временные интервалы. Выявление отраслевых особенностей и анализ эффективности подходов к регулированию является одним из направлений по снижению количества выбросов парниковых газов. При выборе стратегии сокращения выбросов целесообразно опираться как на экономические возможности, так и на технически достижимый результат для каждой отдельной страны. На рис. 1 приведено накопление выбросов CO₂ в странах BRICS с 1901 по 2021 год, ГтCO₂.

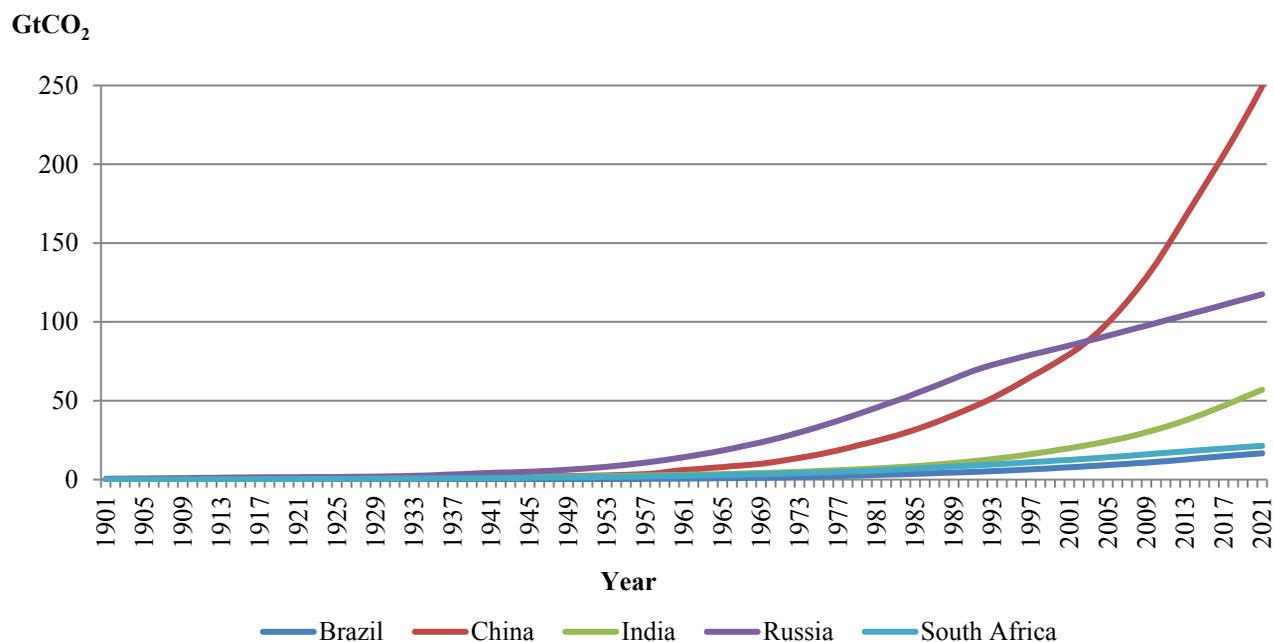


Рис. 1. Накопление выбросов CO₂ в странах BRICS с 1901 по 2021 год, ГтCO₂

Как видно из рис. 1, очевидный тренд на рост выбросов CO₂ в странах BRICS связан с активным развитием промышленности и генерацией энергии. При этом некоторое замедление роста величины выбросов в России с 1990 года связано с замедлением производства в связи с экономическим кризисом. Вероятно, подобная тенденция сохранится или усилится вследствие глобального и регионального кризисов после 2022 года.

Реализация подходов к регулированию выбросов в России включает в себя развитие законодательства, в том числе создание рынка углеродных единиц и создание необходимых условий для устойчивого развития экономики при сокращении выбросов парниковых газов (ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»). Значительная часть потенциала декарбонизации может быть реализована за счет модернизации оборудования и снижения энергоёмкости технологий.

Поскольку глобальные и национальные энергетические системы менялись на протяжении десятилетий, вклад различных источников топлива в выбросы парниковых газов менялся

как географически, так и во времени. На рис. 2 приведена динамика величины выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год.

Как видно из рис. 2, выбросы углекислого газа, связанные с энергетикой и промышленным производством, могут происходить от различных видов топлива. Вклад каждого из этих источников значительно изменился с течением времени и по-прежнему сильно различается по регионам. В настоящее время преобладают твердое и жидкое топливо, хотя вклад газа также заметен. Производство цемента и сжигание в факелах на глобальном уровне остаются сравнительно небольшими.

Тенденции существенно различаются по регионам. Ранняя индустриализация началась с потребления твердого топлива, однако со временем этот энергетический баланс диверсифицировался. Сегодня выбросы CO₂ распределяются примерно поровну между углем, нефтью и газом. Энергетика Азии остается доминирующей в потреблении твердого топлива, и доля цемента здесь значительно выше, чем в других регионах.

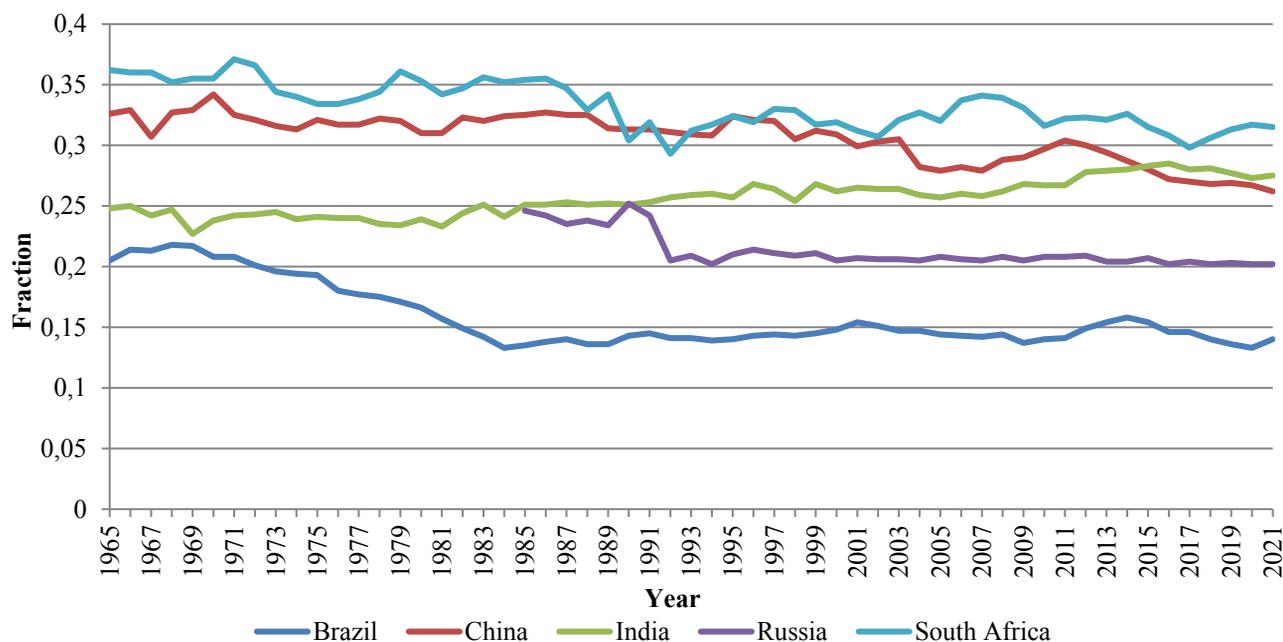


Рис. 2. Величина выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год, доля единицы

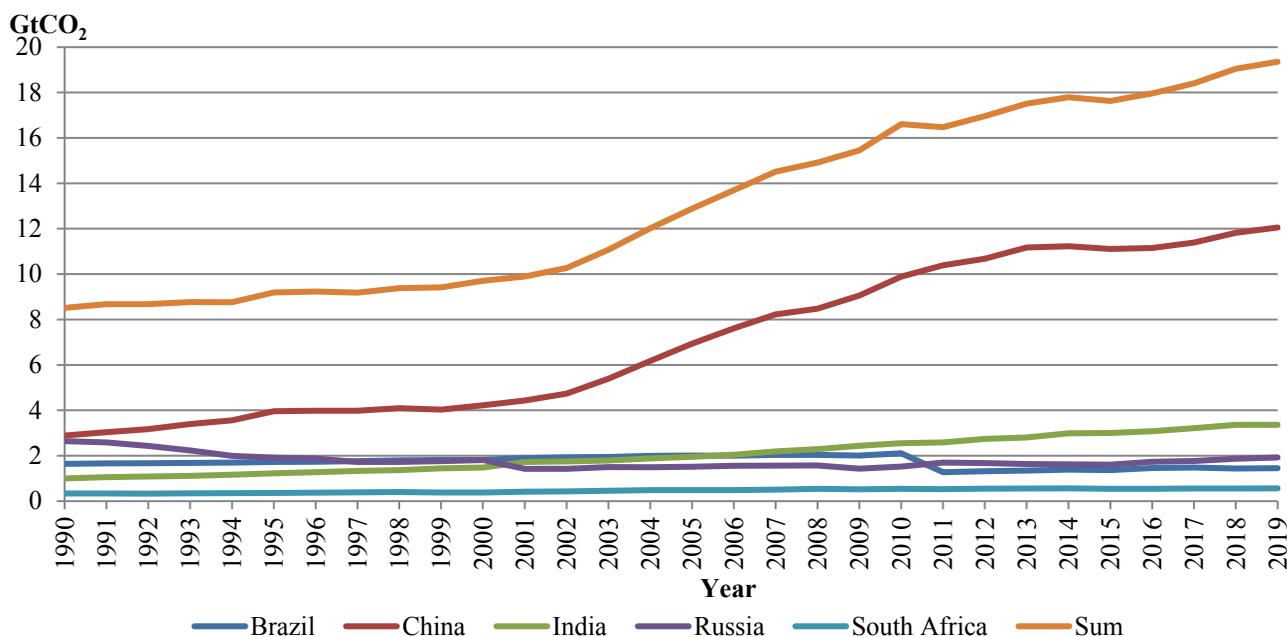


Рис. 3. Общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтCO₂

На рис. 3 приведены общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтCO₂.

Анализ рис. 3 показывает, что суммарная величина выбросов всех видов парниковых газов

в странах BRICS с 1990 по 2019 год составляет 391,91 ГтCO₂. За 2019 год выбросы парниковых газов в странах BRICS составили 19,36 ГтCO₂. Во всем мире за 2019 год в атмосферу поступило 37,08 ГтCO₂. Таким образом, вклад стран BRICS

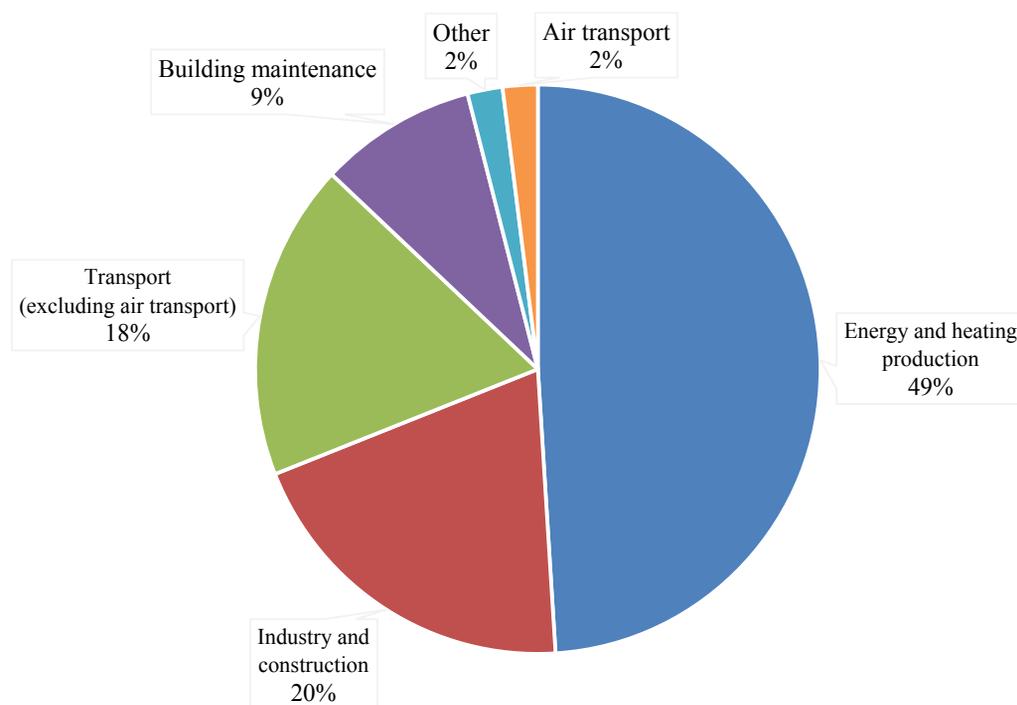


Рис. 4. Источники выбросов CO₂ в мире, доля от общего объема выбросов, %

составляет 52,2 % общемирового выброса парниковых газов.

Большинство из этих газов возникает из-за использования энергии, строительства сооружений для добычи и сжигания полезных ископаемых, выбросов транспорта. На рис. 4 приведены доли от общего объема выбросов CO₂ в мире, в том числе транспорта.

Как видно из рис. 4, основная доля от общего объема выбросов углекислого газа приходится на производство электроэнергии и отопление, однако доля транспорта (за исключением авиационного) составляет 18 %.

Достигнуть углеродной нейтральности можно с помощью применения технологий сокращения или поглощения выбросов. На сегодняшний день существуют несколько технологий поглощения выбросов:

- лесовозобновление или облесение;
- биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода;
- усиленное выветривание;

- улавливание углерода из воздуха и его хранение;
- удобрение океана;
- фиксация углерода в почве.

Результаты

Технологии поглощения выбросов имеют известную степень ограниченности своего потенциала по удалению парниковых газов из атмосферы. Кроме того, пока данные технологии не имеют широкого распространения, в этой связи усложняется оценка их эффективности по смягчению климата. При этом наиболее эффективный способ смягчения последствий изменения климата это прямое сокращение выбросов. Если транспортная отрасль ограничивается оценкой только прямых выбросов парниковых газов и таким образом пытается достичь углеродной нейтральности, это может оцениваться обществом как маскировка под экологичность (гринвошинг). Это обусловлено тем, что углеродный след формируется всеми видами выбросов, возникающих

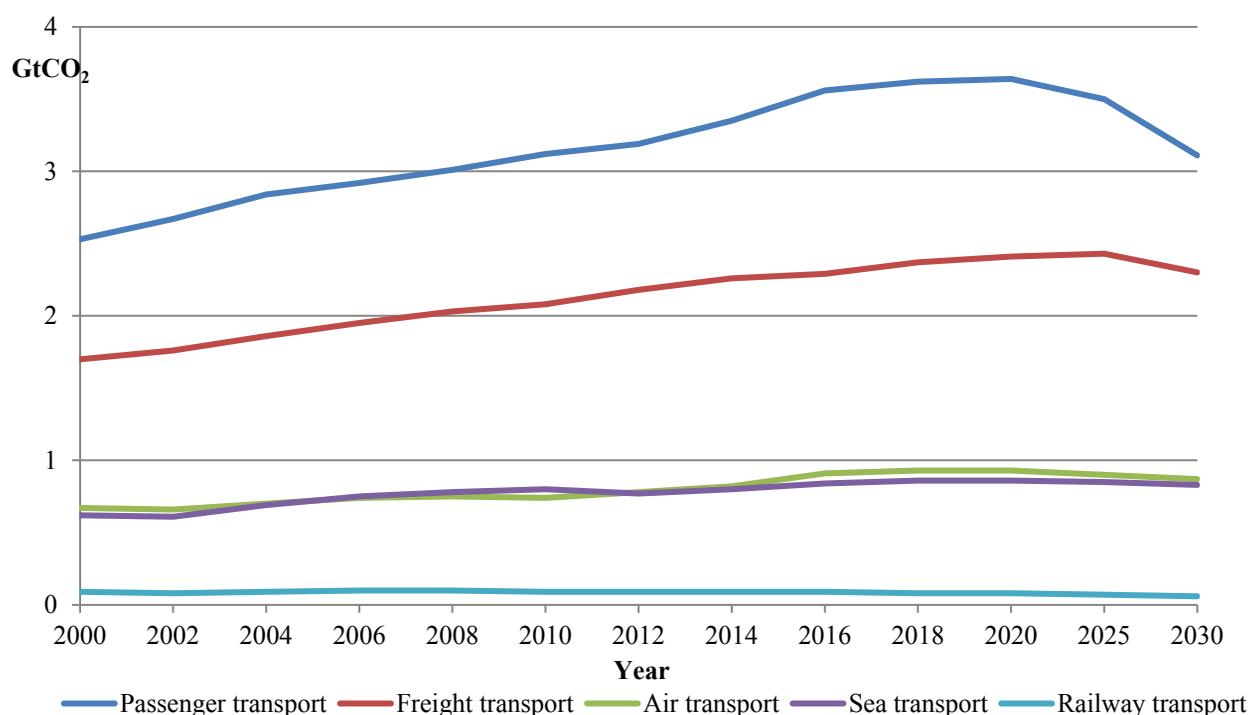


Рис. 5. Величина выбросов CO₂ по видам транспорта (в том числе прогноз при устойчивом развитии)

при деятельности предприятия: вид и источник сырья, технология производства, предоставляемые услуги, обращение с отходами и др.

В целом выбросы железнодорожной отрасли зависят от степени электрификации. Однако при оценке не только прямых, но и косвенных выбросов основное значение приобретают источник энергии и его углеродный след. Значимым является развитие интермодальных перевозок в странах BRICS, так как данные маршруты имеют потенциал снижения выбросов, а также должны быть включены в программы устойчивого развития регионов через равномерное распределение нагрузок, повышение безопасности перевозок и др.

Ключевыми положениями такого регулирования являются принцип материальной ответственности источника загрязнения («загрязнитель платит», *polluter pays*) и принцип «пользователь платит» (*user pays*). Посредством такого регулирования государство (или наднациональный институт) включает издержки пользования общим ресурсом в издержки источника загрязнения.

На долю железнодорожной отрасли приходится 7 % международных грузоперевозок, при этом доля потребления энергии в мировом масштабе составляет 3 %. Величина прямого вклада железнодорожной отрасли в выбросы углекислого газа составляет 0,3 % общемирового (рис. 5).

Как видно из рис. 5, преимущества железнодорожных перевозок имеют свою специфику, связанную с источником энергии. Это приобретает особую значимость в связи с тем, что грузовые перевозки в странах BRICS осуществляются преимущественно тепловозами. Использование тепловозов обусловлено низкой степенью электрификации железных дорог стран BRICS, а также существенными затратами на проведение работ по электрификации железных дорог и обеспечение функционирования данной инфраструктуры. Величина прямых выбросов парниковых газов от тепловозов оценивается в диапазоне от 25 до 60 г CO₂ на тонно-километр, что обусловлено техническими характеристиками локомотивов. При этом величина выбросов парниковых

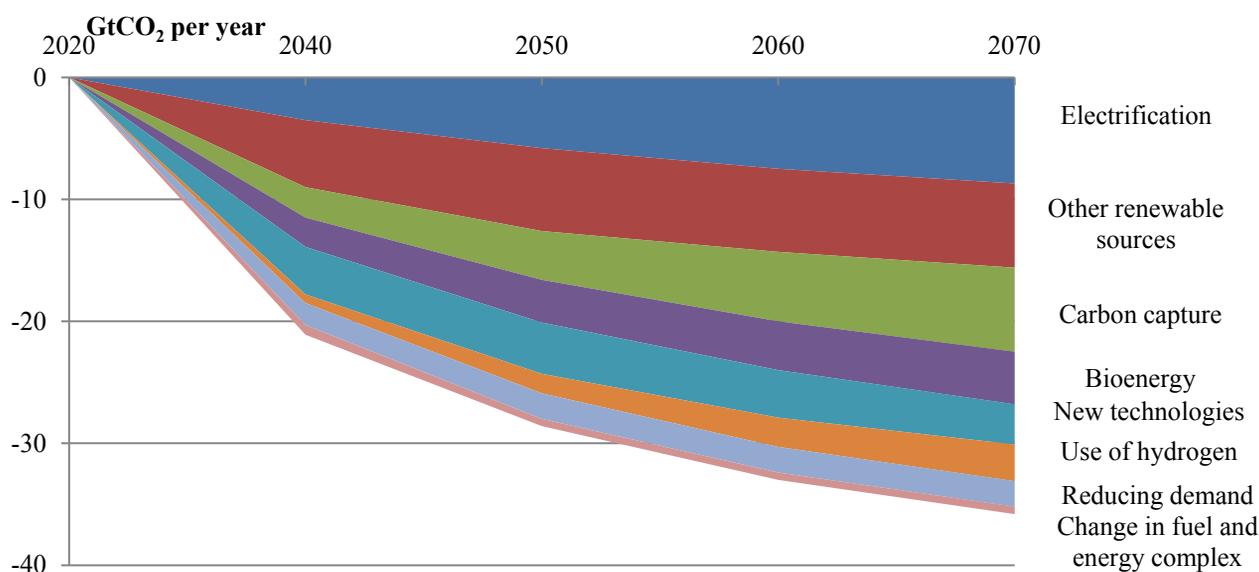


Рис. 6. Планируемое сокращение глобальных выбросов CO₂ от энергетического сектора по видам

газов от электровозов составляет от 10 до 25 г CO₂ на тонно-километр. Даже такой разброс, имеющий значение для регулирования выбросов парниковых газов, сохраняет за железнодорожной отраслью значимые экологические преимущества. В силу объективных обстоятельств, связанных с наличием маршрутов с низкой загрузкой, проведение полной электрификации на железных дорогах стран BRICS может оцениваться как экономически нецелесообразное.

Углеродное регулирование приводит к перераспределению в сфере международных грузовых перевозок стран BRICS. Конкурентные преимущества все больше проявляются у железнодорожного транспорта. Однако данный эффект зависит от того, какими будут мероприятия по адаптации к изменениям рынка перевозок со стороны других видов транспорта. В долгосрочной перспективе на железнодорожную отрасль стран BRICS окажет влияние не только электрификация, но и переход на альтернативные виды топлива (рис. 6).

Обновление как подвижного состава, так и транспортной инфраструктуры позволяет сократить косвенные выбросы парниковых газов

(рис. 6). Для того чтобы данные изменения были реализованы с максимальным экономическим эффектом, целесообразно продолжение поддержки перехода на низкоуглеродное развитие.

Кроме того, сокращение углеродного следа происходит вследствие внедрения современных цифровых технологий, которые оптимизируют производственный процесс и способствуют интеграции между различными видами транспорта. Следует отметить, что внедрение цифровых решений, способных привести к снижению выбросов парниковых газов от железнодорожной отрасли стран BRICS, а также повысить привлекательность железнодорожного транспорта как экологичного вида транспорта, — целесообразно.

Анализ результатов

В XIX веке железные дороги стали символом происходящей промышленной революции. В XXI веке железная дорога, как и вся транспортная отрасль, претерпевает значительные изменения. Реализация стратегии снижения выбросов парниковых газов определяет новые преимущества железнодорожного транспорта, в том числе проведение исследований, разработки и внедре-

ния технологий поглощения выбросов парниковых газов. Виды технологий поглощения парниковых газов, которые могут быть использованы в транспортной отрасли, могут быть отнесены к следующим категориям:

1. *Лесоразведение и лесовосстановление* связано с поглощением углекислого газа в процессе роста лесов. Данная технология поглощения углекислого газа является известной, кроме того, она может быть использована с низкими затратами. Однако следует учитывать, что для поглощения значительных объемов углекислого газа необходимы большие площади восстановленных или высаженных лесов. При этом существует угроза высвобождения запасенного в древесине углерода при нарушении технологий посадки. Возможны выбросы закиси азота при внесении удобрений для стимулирования роста лесов. Также необходима защита лесов от природных пожаров. В засушливых районах потребность в воде также может быть значимым лимитирующим фактором.

2. *Производство биоэнергии с улавливанием и хранением углерода*. Так как в процессе формирования биомасса накапливает углерод и хранит его в виде органического материала, то при сжигании или преобразовании в другие виды энергии, производстве электричества или других видов энергоресурсов происходит поглощение углекислого газа из атмосферы. Однако необходимо учитывать, что углекислый газ, который образуется при сжигании биомассы, должен улавливаться и захораниваться. Преимуществом данной технологии поглощения парниковых газов является то, что она реализована на демонстрационных моделях, при этом ее эффективность и эколого-экономическая целесообразность должна оцениваться применительно к местам возможного расположения.

3. *Прямое улавливание углекислого газа из окружающего воздуха и захоронение*. Существенная часть антропогенно-обусловленных выбросов парниковых газов формируется в рас-

пределенных источниках выбросов. Зачастую улавливание данных выбросов в источнике не является эффективным и нецелесообразным. Для удаления данных выбросов можно производить улавливание углекислого газа непосредственно из окружающего воздуха. Реализация технологии прямого улавливания из атмосферы требует источник энергии и (или) тепла с минимальным углеродным следом, что накладывает ограничение на выбор подходящего места расположения территориями, где есть доступ к такому источнику. При прямом улавливании используется сорбент для поглощения углекислого газа в твердой или жидкой фазе. После поглощения углекислого газа сорбент регенерируется с выделением высококонцентрированного углекислого газа с его дальнейшей транспортировкой и захоронением. Например, в подземных пустотах, из которых идет добыча углеводородов, с последующим закачиванием в горные породы.

Заключение

Низкоуглеродная транспортная отрасль стран BRICS может являться существенным компонентом снижения валовых выбросов парниковых газов, особенно учитывая имеющуюся значительную зависимость от ископаемого углеродного топлива, а также некоторую инерцию, которая обусловлена длительным сроком службы имеющейся инфраструктуры, работающей на ископаемом топливе. Анализ докладов МГЭИК показывает, что сдерживание концентрации углекислого газа в 450 ppm к 2100 году либо невозможно, либо требует существенно больших затрат при условии отсутствия широкого внедрения технологий поглощения выбросов парниковых газов. Так, реализация прогнозного сценария климатических изменений со средним ростом температуры до 2 °С выше доиндустриального уровня предусматривает удаление из атмосферы до 4 ГтСО₂ в год к 2040 году. При этом величина затрат на

сокращение выбросов парниковых газов может быть на 40 % выше без использования рассматриваемых технологий поглощения выбросов парниковых газов, по сравнению с прогнозным сценарием, предусматривающим внедрение данных технологий поглощения выбросов.

В качестве одной из целей Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предусмотрено развитие транспортной системы России с ее трансформацией в цифровой и низкоуглеродной области. Данная трансформация возможна путем ускорения внедрения новых технологий, в том числе технологий поглощения выбросов парниковых газов, что предполагает создание отрасли и инвесторам условий для снижения энерго- и углеродоемкости.

Снижение выбросов парниковых газов от объектов железнодорожного транспорта стран BRICS может заключаться в реализации следующих мер: сокращение прямых выбросов; разработка и реализация технологий поглощения парниковых газов, с учетом геопространственного распределения транспортных объектов и их специфики; привлечение инвестиций и доступ к более дешевому финансированию ряда инновационных проектов; интеграция вопросов смягчения климатических изменений в стратегии развития транспортных компаний; продолжение электрификации транспорта и перехода на альтернативные виды топлива; использование цифровых технологий для оптимизации транспортных систем в направлении сокращения влияния железнодорожной отрасли на окружающую среду.

Библиографический список

1. Titova T. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 49. — Pp. 473–478. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49/.
2. Bardyshev O. A. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities / O. A. Bardyshev, V. A. Popov, S. K. Korovin et al. // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. — 2020. — Iss. 1. — Pp. 52–56. — DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56.
3. Baydarashvili M. Conservation of mineral resources in transport and civil construction / M. Baydarashvili, A. Sakharova, N. Shrednik et al. // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 50. — Pp. 479–486. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_50.
4. Nasyrova E. Geoenvironmental assessment of urban water bodies / E. Nasyrova, A. Elizaryev, S. Aksenov et al. // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — Vol. 110, № 02045. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
5. Ulyasheva V. M. Increasing the efficiency of methods for cleaning of ventilation emissions at construction enterprises / V. M. Ulyasheva, A. M. Gritimlin, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. — 2018. — Iss. 4. — Pp. 92–97. — DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.92-98.
6. Miloslavskaya S. Intermodal transportation using inland water transport in Russia and abroad / S. Miloslavskaya, A. Panychev, A. Myskina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 698(6), № 066059. — DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066059.
7. Bryn M. J. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction / M. J. Bryn, D. A. Afonin, N. N. Bogomolova // *Procedia Engineering*. — 2017. — Iss. 189. — Pp. 386–392. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
8. Baydarashvili M. Criteria of Geocoprotection in Construction / M. Baydarashvili // *Procedia Engineering*. — 2017. — Iss. 189. — Pp. 616–621. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.098.
9. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. — 2019. — Iss. 24(4). — Pp. 71–78. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
10. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova et al. //

MATEC Web of Conferences. — 2018. — Iss. 239, № 06003. — DOI: 10.1051/mateconf/201823906003.

11. Uzdin A. M. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base / A. M. Uzdin, M. V. Freze, M. Y. Fedorova // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2018. — Iss. 55(3). — Pp. 201–208. — DOI: 10.1007/s11204-018-9526-0.

12. Ershova S. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises / S. Ershova, T. Orlovskaya, E. Panfilova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Iss. 463(4), № 042040. — DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042040.

13. Dudkina O. I. On the Strong Law of Large Numbers for Linear Combinations of Concomitants / O. I. Dudkina, N. V. Gribkova // Vestnik St. Petersburg University: Mathematics. — 2020. — Iss. 53(3). — Pp. 282–286. — DOI: 10.1134/S1063454120030061.

14. Kolos A. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays / A. Kolos, V. Alpysova, G. Osipov // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. —

Iss. 50. — Pp. 295–306. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.

15. Vvedenskij R. V. Environmental impact of the tunnel construction / R. V. Vvedenskij, S. G. Gendler, T. S. Titova // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — Iss. 79(3). — Pp. 140–149. — DOI: 10.18720/MCE.79.15.

16. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. — URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (дата обращения: 08.03.2023).

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 07.07.2023

Контактная информация:

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.;
ahtamov_zchs@mail.ru

МАКАРОВА Елена Игоревна — д-р техн. наук, доц.;
makarova@mail.ru

ГАВРИЛОВА Алина Анатольевна — ст. преподаватель;
A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

Analysis of Greenhouse Gas Emissions in BRICS and Ways to Reduce Emissions from Rail Transport

R. G. Akhtyamov, E. I. Makarova, A. A. Gavrilova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Akhtyamov R. G., Makarova E. I., Gavrilova A. A. Analysis of Greenhouse Gas Emissions in BRICS and Ways to Reduce Emissions from Rail Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 694–705. (In Russian). DOI: 10.20295 1815-588X-2023-3-694-705

Summary

Purpose: To analyze greenhouse gas emissions from the BRICS countries, as well as ways to reduce emissions from rail transport. **Methods:** The contribution of the BRICS countries to global greenhouse gas emissions based on an array of statistical data for the period from 1990 to 2019 has been estimated. The value of CO₂ emissions per unit of energy produced in the BRICS countries from 1965 to 2021, as well as the sources of CO₂ emissions, have been determined. **Results:** It is shown that the most effective way to combat climate change is to directly reduce emissions. In general, the emissions of the railway industry depend on the level of electrification. However, when assessing not only direct but also indirect emissions, the energy source

and its carbon footprint become of primary importance. The development of intermodal transportation in BRICS countries is significant because these routes have the potential to reduce emissions. Carbon regulation leads to a redistribution in the sphere of international freight transportation among BRICS countries. Competitive advantages are increasingly evident in the railway transportation sector. However, this effect depends on the measures taken to adapt to changes in the transportation market by other modes of transportation. **Practical significance:** Ways to improve the sustainability of transport infrastructure have been formulated. The low-carbon transport industry in the BRICS countries can be seen as an important component in reducing gross greenhouse gas emissions given the current high level of reliance on fossil carbon fuels and the inertia driven by the long life of fossil fuel infrastructure. Without the use of negative emission technologies, the required costs for reducing greenhouse gas emissions can be 40 % higher than with the use of negative emission technologies. As part of the reduction of greenhouse gas emissions by railway transport facilities in the BRICS countries, the following measures can be implemented: direct reduction of greenhouse gas emissions; introduction and implementation of technologies for negative emissions at railway transport facilities, taking into account their geospatial distribution and their specific characteristics; attracting investments and ensuring access to more affordable financing for these projects; integration of climate change mitigation issues into the strategies of transportation companies; further electrification in transportation and transitioning to alternative fuel sources; utilization of digital technologies to optimize transportation systems and reduce the environmental impact of the railway industry.

Keywords: Global warming, sustainable development, railway industry, climate change, low-carbon transport industry, carbon dioxide emissions, negative emission technologies.

References

1. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 49, pp. 473–478. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
2. Bardyshev O. A., Popov V. A., Korovin S. K. et al. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2020, Iss. 1, pp. 52–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56.
3. Baydarashvili M., Sakharova A., Shrednik N. Conservation of mineral resources in transport and civil construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 50, pp. 479–486. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_50.
4. Nasyrova E., Elizaryev A., Aksenov S. et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences*, 2019, Iss. 110, № 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
5. Ulyasheva V. M., Grititlin A. M., Chernikov N. A. Increasing the efficiency of methods for cleaning of ventilation emissions at construction enterprises. *Water and Ecology*, 2018, Iss. 4, pp. 92–97. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.92-98.
6. Miloslavskaya S., Panychev A., Myskina A. et al. Intermodal transportation using inland water transport in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Iss. 698(6), № 066059. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066059.
7. Bryn M. J., Afonin D. A., Bogomolova N. N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*, 2017, Iss. 189, pp. 386–392. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
8. Baydarashvili M. Criteria of Geocoprotection in Construction. *Procedia Engineering*, 2017, Iss. 189, pp. 616–621. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.098.
9. Terekhov L. D., Mayny S. B., Chernikov N. A. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter. *Water and Ecology*, 2019, Iss. 24(4), pp. 71–78. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
10. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Accident at river-crossing underwater oil pipeline. *MATEC Web of Conferences*, 2018, Iss. 239, № 06003. DOI: 10.1051/matecconf/201823906003.

11. Uzdin A. M., Freze M. V., Fedorova M. Y. et al. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, Iss. 55(3), pp. 201–208. DOI: 10.1007/s11204-018-9526-0.

12. Ershova S., Orlovskaya T., Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Iss. 463(4), № 042040. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042040.

13. Dudkina O. I., Gribkova N. V. On the Strong Law of Large Numbers for Linear Combinations of Concomitants. *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*, 2020, Iss. 53(3), pp. 282–286. DOI: 10.1134/S1063454120030061.

14. Kolos A., Alpysova V., Osipov G. et al. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 50, pp. 295–306. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.

15. Vvedenskij R. V., Gendler S. G., Titova T. S. Environmental impact of the tunnel construction. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, Iss. 79(3), pp. 140–149. DOI: 10.18720/MCE.79.15.

16. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. Available at: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (accessed: March 8, 2023).

Received: May 28, 2023

Accepted: July 07, 2023

Author's information:

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ahtamov_zchs@mail.ru

Elena I. MAKAROVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; makarova@mail.ru

Alina A. GAVRILOVA — Senior Lecturer; A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru