

Научная статья

УДК 504.004:69.003; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-162-174

СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

✉ Смирнова Елена Эдуардовна.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия.

Данилович Геннадий Федорович.

ООО «Стандарт Систем Безопасности», Санкт-Петербург, Россия.

Мамедов Назим Магомед оглы.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ esmirnovae@yandex.ru

Аннотация. Проводится сравнительный анализ различных строительных материалов в ракурсе углеродного следа. Объектом исследования является содержание углеродного следа и его значение для обеспечения экологической безопасности строительства. Цель – рассмотрение углеродного следа как индикатора устойчивого развития. Для его оценки авторы использовали сценарный подход, основанный на концепции динамического баланса. Авторы количественно определяют выбросы парниковых газов на разных этапах жизненного цикла объекта. Разработаны сценарии развития рискованных ситуаций и определены их параметры. Пересчет сценария с использованием пеностекла выявляет снижение углеродного следа на 56 %. Это значительный шаг к экологической безопасности, что соответствует лучшим практикам низкоуглеродного строительства в мире.

Ключевые слова: низкоуглеродное строительство, оценка риска, пеностекло, сравнительный анализ, сценарный подход, углеродный след, управление рисками, экологическая безопасность, экологический менеджмент

Для цитирования: Смирнова Е.Э., Данилович Г.Ф., Мамедов Н.М. Снижение углеродного следа в строительстве: сравнительный анализ применения традиционных и инновационных материалов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 162–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-162-174.

Scientific article

CONSTRUCTION CARBON FOOTPRINT REDUCTION: A COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND INNOVATIVE MATERIALS

✉ Smirnova Elena E.

Saint-Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint-Petersburg, Russia.

Danilovich Gennadiy F.

LLC «Standard Security Systems», Saint-Petersburg, Russia.

Mamedov Nazim Magomed ogly.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ esmirnovae@yandex.ru

Abstract. This study examines the carbon footprint of various construction materials, focusing on embodied carbon and its role in achieving sustainable construction. The objective is to examine carbon footprint as an indicator of sustainable development. To assess it, the authors

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

employed a scenario-based approach grounded in the concept of dynamic balance. The authors quantitatively determine greenhouse gas emissions at different stages of the project's life cycle. Risk scenarios are developed, and their parameters are defined. Recalculating the scenario using foamed glass, best practices, and other factors reveals a 56 % reduction in carbon footprint. This represents a substantial step towards environmental sustainability, aligning with global best practices for low-carbon construction.

Keywords: low-carbon construction, risk assessment, foam glass, comparative analysis, scenario approach, carbon footprint, risk management, environmental safety, environmental management

For citation: Smirnova E.E., Danilovich G.F., Mamedov N.M. Construction carbon footprint reduction: a comparative analysis of traditional and innovative materials // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 3 (71). P. 162–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-162-174.

Введение

Проблемы устойчивого развития требуют снижения выбросов в атмосферу. Для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду и изменения климата необходимы комплексные решения в различных сферах. В первую очередь это касается энергетического сектора, где требуется постепенный отказ от традиционных источников энергии в пользу возобновляемых. Также необходимо сокращение производства товаров с высоким углеродным следом и ускоренное внедрение модели циркулярной экономики, где отходы становятся ресурсами.

Строительная отрасль, являясь одним из основных источников выбросов парниковых газов, играет одну из ведущих ролей в реализации этих мер. На углеродный след, связанный со строительными материалами, влияет множество факторов, в том числе:

- тип материала: различные материалы имеют отчетливый углеродный след; например, бетон характеризуется значительным углеродным следом, тогда как древесина представляет собой сравнительно более экологичную альтернативу;
- производственный процесс: изготовление материалов часто связано с большим потреблением энергии, что приводит к значительным выбросам парниковых газов;
- транспортировка: перемещение материалов на большие расстояния увеличивает объем углеродного загрязнения;
- утилизация: методы, используемые при переработке материалов, значительно влияют на общий объем образующихся выбросов [1].

Снижение углеродного следа (неотъемлемого аспекта экологического следа) зданий и количества ресурсов, необходимых для строительства, использование экологически чистых материалов для создания менее энергоемких объектов, использование цифровых технологий для визуализации различных компонентов проекта и выявления проблем до реализации плана, – все эти меры позволяют повысить качество строительства и сохранить слагаемые природного окружения, такие как леса, пастбища и т.п. [2].

Ученые, изучающие загрязнение атмосферы выбросами парниковых газов, оценивают экологическую эффективность различных материалов, используя два основных показателя: экологический след и углеродный [3]. Экологический след – это комплексный показатель, отражающий потребление природных ресурсов и выделение отходов в процессе жизнедеятельности человека. Он измеряется в гектарах (га) на человека или в глобальных гектарах (гга), то есть в гектарах биологически продуктивной территории [4]. Углеродный след – часть экологического следа, которая отражает влияние человеческой деятельности на климат планеты. Он измеряется в тоннах эквивалента CO₂ и учитывает выбросы парниковых газов (ПГ) на всех этапах жизненного цикла объекта. В данной статье авторы фокусируются на углеродном следе, так как он является ключевым показателем

для оценки влияния строительства на изменение климата. Для понимания этой проблемы необходимо разобраться в концепции динамического равновесия между углеродным следом и пропускной способностью углерода.

Пропускная способность углерода – потенциальная возможность экосистемы поглощать и хранить углерод. Она является важным фактором экологической безопасности. Углерод может храниться в разных формах в экосистемах, включая леса, почвы, океаны и даже атмосферу. Леса являются одним из самых значимых углеродных резервуаров на планете, поглощая углекислый газ (CO_2) из атмосферы через фотосинтез и сохраняя его в виде биомассы (деревья, растения) и в почве (например, мертвые растения разлагаются, а их углерод остается в почве, торфяники хранят углерод тысячелетия). Увеличение концентрации CO_2 в атмосфере связано с глобальным потеплением и изменением климата. Понимание же пропускной способности углерода помогает оценить влияние различных экосистем на глобальное потепление [5].

Экологическая безопасность подразумевает меры по защите окружающей среды от негативного воздействия человеческой деятельности. Динамическое равновесие углеродного следа относится к состоянию, в котором выбросы углекислого газа (углеродный след) находятся в балансе с поглощающей способностью экосистем, а также мерами по снижению выбросов, такими как использование возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности [6]. Данная концепция важна для достижения целей устойчивого развития и борьбы с изменением климата. Ключевое условие для этого равновесия: углеродный след не должен превышать пропускную способность углерода. В противном случае атмосфера будет накапливать CO_2 , что приведет к усилению парникового эффекта. Важно понимать, что равновесие динамично и может измениться под влиянием антропогенного фактора, а это повлияет на пропускную способность биосферы поглощать и перерабатывать выбросы CO_2 . Для поддержания равновесия необходимо снижать углеродный след хозяйствующих субъектов, достигая прогресса путем перехода к более экологически чистым технологиям и источникам энергии, а также путем сохранения и восстановления природных экосистем, способных поглощать CO_2 .

Однако нельзя замалчивать тот факт, что ряд ученых считает проблему глобального потепления сомнительной. В работе Н.В. Вакуленко и др. (2015) обсуждается альтернатива концепции об изменении климата из-за увеличения концентраций ПГ. В качестве причины потепления рассматривается 180-летний цикл вращения Солнца вокруг центра масс Солнечной системы [7]. По мнению Ю.П. Переведенцева и др. (2013), в период 1988–2000 гг. потепление климата происходило на пониженном фоне атмосферного давления, что свидетельствует о росте циклонической активности в периоды потепления климата в начале XX в. и в последние десятилетия на рубеже XX и XXI вв. [8]. Wallace J.M. и др. (2002) отмечают, что современные климатические изменения определяются сугубо природными факторами [9]. Другие исследователи считают переход к углеродной нейтральности не отвечающим требованиям экономической целесообразности [10].

В 2021 г. на фоне неоднозначных оценок Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) заявила об угрозе серьезных неизбежных и необратимых изменений климата [11].

Несмотря на эти дискуссии, концепция динамического равновесия между углеродным следом и пропускной способностью углерода остается актуальной. Независимо от позиции ученых по поводу причин изменения климата, устойчивое развитие строительной отрасли требует снижения углеродного следа. Применение экологически чистых материалов, повышение энергоэффективности зданий, утилизация отходов и восстановление лесных массивов – это необходимые шаги, которые должны быть предприняты для обеспечения экологической безопасности в строительстве.

Цель и задачи исследования

Цель данной статьи – провести сравнительный анализ углеродного следа строительства объекта (завода по производству пеностекла) с использованием традиционных и инновационных материалов с целью обоснования выбора экологически безопасного варианта. Перед авторами стоят следующие задачи:

1. Сравнить углеродный след строительства объекта в двух сценариях.
2. Выявить разницу в выбросах ПГ при внедрении традиционных и инновационных материалов.
3. Определить преимущества пеностекла с точки зрения экологического следа.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на системном подходе к изучению проблемы экологической безопасности строительства. Для оценки углеродного следа строительства рассматривался подход, сочетающий методы экономического, экологического и аналитического исследования. Концепция углеродного следа представляет собой инструмент учета ресурсов, который выявляет пределы их использования, помогает оценить риск перерасхода материалов и способствует устойчивому развитию.

Методика расчета выбросов ПГ

Научная новизна работы заключается в разработке методики оценки углеродного следа объекта (завода по производству пеностекла) с последующим внедрением инновационного материала в строительство. Авторами представлен сценарный подход, базирующийся на концепции динамического равновесия между углеродным следом и пропускной способностью углерода. Данная методология включает в себя следующие этапы:

1. Сбор данных: информация о количестве и типах используемых материалов, объеме строительных работ, энергопотреблении и транспортных перевозках собиралась из деклараций производителей, Руководства по инвентаризации парниковых газов, принятому IPCC [12], и методических указаний, утвержденных в Российской Федерации [13, 14].

2. Расчет выбросов ПГ – для расчета выбросов ПГ использовались следующие методы:

- метод IPCC;
- метод деклараций производителей;
- метод расчета на основе энергопотребления;
- сводный расчет углеродного следа [15].

Результаты исследования и их обсуждение

Жизненный цикл здания

Согласно СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» жизненный цикл здания определяется как процесс, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения. Он включает в себя широкий спектр материалов, ресурсов, сопутствующих отходов, образующихся в результате хозяйственной деятельности [16].

Анализ сценария 1

Сценарий 1. Расчет выбросов ПГ в строительстве завода по производству пеностекла мощностью 1 000 т в год, расположенного в Ленинградской обл., г. Ломоносов (завод находится в стадии строительства).

Основные материалы: товарный бетон марки М300 (100 м³, «Петербургский бетон»), керамический кирпич (20 000 шт., «БетаБетон»), доска сосновая обрезная для опалубки (50 м³, «Возрождение», FE 100 %, сертификат «Лесной эталон»), арматурная сталь АШ 16–32 мм (10 т, «Петербургский бетон»), оконное стекло (5 т, завод «Балтийское стекло»), двухкамерные стеклопакеты (10 шт., «Окна Плюс», пластиковое окно ПВХ РЕХАУ BLITZ 600x500 мм (ВxШ) с учетом подставочного профиля).

В рамках данного сценария будет произведен расчет углеродного следа строительства объекта с использованием различных материалов и технологий, анализ влияния различных этапов жизненного цикла объекта на его углеродный след, определение эффективности мер по его снижению (табл. 1–5).

Таблица 1

Выбросы от добычи и переработка материалов

Материал	Тип	Производитель	Объем/Количество	Декларация производителя (т CO ₂ e)	IPCC (т CO ₂ e)	Выбросы от производства (т CO ₂ e)	Выбросы от транспортировки (т CO ₂ e)	Итого (т CO ₂ e)
Бетон	Товарный бетон М300	Бетонный завод «Петербургский бетон»	100 м ³	0,98 т CO ₂ e/м ³	0,91 т CO ₂ e/м ³	98	13	111
Кирпич	Керамический кирпич	Кирпичный завод «БетаБетон»	20 000 шт.	0,82 т CO ₂ e/тыс. шт.	0,75 т CO ₂ e/тыс. шт.	16,4	40	56,4
Дерево	Сосна	ООО «Возрождение». Сертификат «Лесной эталон»	50 м ³	N/A	0,05 т CO ₂ e/м ³	2,5	N/A	2,5
Сталь	Арматурная сталь АШ	Бетонный завод «Петербургский бетон»	10 т	1,85 т CO ₂ e	1,90 т CO ₂ e	18,5	N/A	18,5
Стекло	Оконное стекло	Стекольный завод «Балтийское стекло»	5 т	0,25 т CO ₂ e	0,27 т CO ₂ e	1,25	N/A	1,25
Металлопластик	Двухкамерные окна	ООО «Окна Плюс»	10 шт.	0,15 т CO ₂ e/окно	0,17 т CO ₂ e/окно	1,5	N/A	1,5

Итого по добыче и переработке:

– с использованием деклараций производителей (включая выбросы от транспортировки бетона: 130 т CO₂e и кирпича 40 т CO₂e): 308,15 т CO₂e;

– с использованием данных IPCC: 300,55 т CO₂e.

Таблица 2

Выбросы от строительства

Техника	Время работы (ч)	Потребление топлива (л/ч)	Выбросы от топлива (т CO ₂ e/т)	Выбросы от техники (т CO ₂ e)
Экскаватор (дизель)	200	10	2,67	4,92
Грузовик (бензин)	500	20	2,67	1,01
Бетономешалка (дизель)	100	5	2,67	1,16

Таблица 3

Выбросы от транспортировки материалов для строительства

Материал	Тип транспорта	Расстояние (км)	Выбросы от транспорта (т CO ₂ e/км)	Выбросы от транспортировки (т CO ₂ e)
Бетон	Автобетоносмеситель	50	0,026	1,3
Кирпич	Контейнерный перевоз	5 000	0,04	200

Итого по строительству:

– с использованием данных по технике: 7,09 т CO₂e;

– с использованием данных по транспортировке: 201,3 т CO₂e.

Всего: 208,39 т CO₂e.

Таблица 4

Выбросы от эксплуатации

Тип энергии	Объем потребления	Выбросы от энергии (т CO ₂ e)
Электричество	5 000 кВт·ч/год	112,5 т CO ₂ e
Газ	2 000 м ³ /год	200 т CO ₂ e
Вода	100 м ³ /год	0,3 т CO ₂ e

Итого по эксплуатации: 312,8 т CO₂e.

Таблица 5

Выбросы от сноса и переработки отходов

Тип отходов	Количество (м ³)	Выбросы от складирования (т CO ₂ e)	Выбросы от переработки (т CO ₂ e)	Итого (т CO ₂ e)
Обломки	30	3,36	-4,5	-1,14

Итого по сносу и переработке отходов: -1,14 т CO₂e (процесс переработка приводит к сокращению выбросов).

Дополнительные факторы (выбросы, связанные с деятельностью рабочих) – поездки на работу:

$$50 \text{ чел.} \times 20 \text{ км/день} \times 250 \text{ дней/год} \times 50 \text{ лет} \times 0,2 \text{ кг CO}_2\text{e/км/чел.} = 2\,500 \text{ т CO}_2\text{e.}$$

Общий расчет выбросов

Вариант 1 (с использованием деклараций производителей):

$$308,15 + 208,39 + 312,8 - 1,14 + 2500 = 3\,328,2 \text{ т CO}_2\text{e.}$$

Вариант 2 (с использованием данных IPCC):

$$300,55 + 208,39 + 312,8 - 1,14 + 2500 = 3\,320,6 \text{ т CO}_2\text{e.}$$

Обоснование реалистичности исходных данных включает несколько факторов. Во-первых, учитывается характер материалов. Для строительства небольшого завода (1000 т пеностекла в год) по производству пеностекла используется товарный бетон марки М300. Объем используемого бетона – 100 м³. Данные о выбросах бетона основаны на декларации производителя «Петербургский бетон» в размере 0,98 т CO₂e/м³, что соответствует средним значениям для товарного бетона. В дополнение предоставлены данные от IPCC (МГЭИК), авторитетного источника, о выбросах ПГ в размере 0,91 т CO₂e/м³.

Углеродный след: минимизация вреда от производства бетона

Согласно отчетам IPCC общие глобальные выбросы ПГ в 2020 г. достигли 59,1 млрд т CO₂e. Для небольшого завода по производству пеностекла (выпуск 1 тыс. т продукции в год) величина 0,000000529 % от глобальных выбросов кажется несущественной, но в масштабе района или даже области она может быть заметной. Выбросы 312,8 т CO₂e сопоставимы с выбросами от 150 средних по размеру жилых домов за год. Предположим, что средний дом потребляет 10 000 кВтч газа в год для отопления и горячей воды. Средний КПД газового котла составляет 85 %. Тогда 1 кВтч газа эквивалентен 0,2 кг CO₂e. Выбросы одного дома составят 2 т CO₂e (10 000 кВтч × 0,2 кг CO₂e/кВтч), а 150 домов – 300 т CO₂e. Согласно стандартным коэффициентам выбросов для пеностеклового производства деятельность завода приведет к выбросу в атмосферу 10 т NO_x и 5 т SO_x в год [17].

Переработка строительных отходов: вклад в снижение углеродного следа

Снос зданий и сооружений неизбежно приводит к образованию строительных отходов, составляющих порядка 30 % от общей массы материалов. Традиционно эти отходы складываются на свалках, что влечет за собой выбросы парниковых газов. Однако альтернативный подход – переработка строительных отходов – значительно сокращает негативное воздействие на окружающую среду.

Переработка строительных отходов, таких как бетон, кирпич, стекло, металл, позволяет повторно использовать материалы, снижая потребность в добыче новых ресурсов. Этот процесс также сокращает выбросы ПГ, связанные с производством новых материалов. Например, хранение строительных отходов на свалках приводит к выбросам 0,16 т CO₂e на тонну материала, что соответствует средним значениям. В то же время переработка строительных отходов позволяет сократить выбросы на 0,5 т CO₂e на тонну материала, что соответствует требованиям экологической безопасности в рамках модели жизненного цикла [18]. В итоге переработка 1 т строительных отходов приводит к сокращению выбросов ПГ на 1,14 т CO₂e (в табл. со знаком «минус»). Исследования Н. Wu и др. (2015), проведенные в Шэньчжэне (Китай), показали, что переработка строительных отходов позволяет снизить выбросы до 483,85 кг CO₂e на тонну отходов. Это подтверждает эффективность переработки в сокращении выбросов ПГ.

Снижение 1,14 т CO₂e – важное достижение, если рассматривать его с точки зрения конкретных показателей: переработка 1 т строительных отходов приводит к сокращению

CO₂e на 1,14 т, по расчетам же исследователей из Stockholm Environment Institute, переработка всего лишь 18 т строительных отходов позволяет уменьшить выбросы, эквивалентные годовому углеродному следу среднестатистического британского домохозяйства (20,7 т CO₂e) [19].

Влияние поездок сотрудников на углеродный след завода

На строящемся предприятии в г. Ломоносове работает 50 чел., и они преодолевают расстояние 20 км в день. Такие данные были выбраны на основе проведенного американским ученым в 2024 г. статистического исследования. В нем утверждается, что в среднем 9 из 10 американских работников проезжают 18,8 миль (30,3 км) до работы в одну сторону (табл. 6) [20].

Таблица 6

Средние показатели времени и расстояния поездок на работу (2024 г.)

Тип поездки до работы	Среднее время (мин)	Среднее расстояние (мили)	Число работников	Процент от общего числа работников
Средний	27,6	18,8	71 203 000	94,00 %
Экстремальный	117,6	70,9	1 714 000	2,26 %
Дальний	61,3	247,3	2 242 000	2,96 %
Мега	119	166,4	587 000	0,77 %

В общей сложности 2 500 т CO₂e за 50 лет представляют собой в среднем 50 т CO₂e в год. Хотя выбросы от поездок на работу составляют малую часть общего углеродного следа, они по-прежнему являются важным фактором, сокращение которого должно быть регулярным и целенаправленным.

Анализ сценария 2

Рассмотрим прежний сценарий, но только с использованием экологичного материала – пеностекла и лучших практик строительства. Лучшая практика понимается как сочетание организационных, технических и методологических стратегий, направленных на разработку точной инвентаризации ПГ, которая позволяет избежать как завышения, так и занижения выбросов на основе используемых методов и подходов, а также минимизировать неопределенность оценок в максимально возможной степени.

Пересчет сценария 1 с использованием пеностекла и лучших практик

Сравнение сценариев показывает (табл. 7):

- снижение углеродного следа: сценарий 2 демонстрирует снижение углеродного следа на 56 % по сравнению со сценарием 1 (как по декларациям производителей, так и по данным IPCC);
- ключевой фактор: использование пеностекла является решающим фактором снижения выбросов в сценарии 2;
- другие факторы: энергоэффективность, оптимизация строительства, экологичный транспорт также вносят значительный вклад в снижение углеродного следа.

Таблица 7

Сценарий 2 (пеностекло и лучшие практики): Углеродный след строительства

Категория	Сценарий 1	Сценарий 2	Изменения
1. Добыча и переработка материалов			
Пеностекло	–	7,5 т CO ₂ e (декларация) / 8,5 т CO ₂ e (IPCC)	+7,5 т (декларация) / +8,5 т (IPCC)
Бетон	98 т CO ₂ e (декларация) / 91 т CO ₂ e (IPCC)	49 т CO ₂ e (декларация) / 45,5 т CO ₂ e (IPCC)	-49 т (декларация) / -45,5 т (IPCC)
Кирпич	16,4 т CO ₂ e (декларация) / 15 т CO ₂ e (IPCC)	–	-16,4 т (декларация) / -15 т (IPCC)
Дерево	2,5 т CO ₂ e (IPCC)	1,25 т CO ₂ e (IPCC)	-1,25 т (IPCC)
Сталь	18,5 т CO ₂ e (декларация) / 19 т CO ₂ e (IPCC)	9,25 т CO ₂ e (декларация) / 9,5 т CO ₂ e (IPCC)	-9,25 т (декларация) / -9,5 т (IPCC)
Стекло	1,25 т CO ₂ e (декларация) / 1,35 т CO ₂ e (IPCC)	0,625 т CO ₂ e (декларация) / 0,675 т CO ₂ e (IPCC)	-0,625 т (декларация) / -0,675 т (IPCC)
Металлопластиковые окна	1,5 т CO ₂ e (декларация) / 1,7 т CO ₂ e (IPCC)	0,75 т CO ₂ e (декларация) / 0,85 т CO ₂ e (IPCC)	-0,75 т (декларация) / -0,85 т (IPCC)
Выбросы от транспортировки бетона: 0,026 т CO ₂ e/км × 50 км × 100 м ³ и 50 м ³	130 т CO ₂ e	65 т CO ₂ e	–65
Выбросы от транспортировки кирпича: 0,04 т CO ₂ e/км × 5000 км	40 т CO ₂ e	–	–40
Итого	308,15 т CO ₂ e (декларация) / 300,55 т CO ₂ e (IPCC)	133,375 т CO ₂ e (декларация) / 131,275 т CO ₂ e (IPCC)	-174,775 т (декларация) / -169,275 т (IPCC)
2. Строительство	208,39 т CO ₂ e	4,3 т CO ₂ e	-204,09 т
3. Эксплуатация (50 лет)	312,8 т CO ₂ e	72 т CO ₂ e	-240,8 т
4. Снос и переработка отходов	-1,14 т CO ₂ e	-1,14 т CO ₂ e	–
5. Дополнительные факторы: выбросы, связанные с деятельностью рабочих. Поездки на работу	2 500 т CO ₂ e 20 км/день	1 250 т CO ₂ e 10 км/день	-1 250 т
Итого	3 328,2 т CO ₂ e (декларация) / 3 320,6 т CO ₂ e (IPCC)	1 458,535 т CO ₂ e (декларация) / 1 456,435 т CO ₂ e (IPCC)	-1 869,665 т (декларация) / -1 864,165 т (IPCC)

Анализ сценария 2 с точки зрения концепции динамического равновесия

Проанализируем сценарий 2 с точки зрения концепции динамического равновесия между углеродным следом и пропускной способностью углерода:

1. Добыча и переработка материалов: введение пеностекла вместо кирпича и уменьшение объема других материалов (бетон, стекло, сталь) помогает снизить выбросы. Однако, с учетом изменений, общий выброс на этом жизненном цикле заметно снизился – более чем на половину (на 57 %).

2. Строительство: общий выброс от техники, материалов и их транспортировки существенно сократился по сравнению с предыдущим сценарием (на 98 %). Это

подтверждает эффективность принятых мер в направлении снижения углеродного следа строительства.

3. Эксплуатация: внедрение энергоэффективных технологий и использование более экологических источников энергии и других лучших практик снижает выбросы на этом жизненном цикле (на 77 %).

4. Снос и переработка отходов: оптимизация строительства и использование более экологических материалов для вторичной переработки приводит к уменьшению выбросов за счет переработки и т.д. В данном случае не произошло изменения выбросов от сноса и переработки, так как в обоих сценариях применены одинаковые методы и технологии утилизации.

5. Дополнительные факторы: усилия по стимулированию использования экологичного транспорта, компактному размещению рабочих и гибкому графику работы помогают снизить выбросы (на 50 %). В данном случае указаны два варианта изменения выбросов в зависимости от доставки работников на работу. Это показывает, что даже малые изменения в поведении могут влиять на углеродный след.

Сценарий 2 с пеностеклом соответствует мировой низкоуглеродной практике строительства и демонстрирует положительную динамику снижения углеродного следа на 56 % [21]. Очевидно, что, несмотря на высокую стоимость (от 1 300 руб. до 6 000 руб. за м³), использование пеностекла компенсирует потребность в достижении определенного термического сопротивления ограждающих конструкций. Если учесть уменьшение веса и толщины конструкций, упрощение монтажа, повышение безопасности, преимущества пеностекла для сокращения углеродного следа совершенно очевидны: будут сохранены огромные массивы лесов, необходимых для поглощения углерода, или, в качестве альтернативы, гектары полей, необходимых для выращивания биотоплива.

Заключение

Авторы оценили применение пеностекла для уменьшения углеродного следа и обратили внимание на важность правильного подсчета выбросов ПГ для достижения динамического равновесия между углеродным следом и пропускной способностью углерода. Были разработаны два сценария: первый для оценки углеродного следа строительства завода с использованием традиционных материалов и технологий, второй для подтверждения снижения углеродного следа при использовании пеностекла и лучших практик строительства. Такой подход позволяет наглядно показать преимущества использования инновационных материалов и технологий с точки зрения экологической безопасности. Подход, представленный в статье, может быть использован для более глубокой и всесторонней оценки рисков в сфере экологической безопасности строительства.

Список источников

1. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research / L. Yuan [et al.] // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 107. P. 107551.
2. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации / Д.К. Нургалиев [и др.] // *Георесурсы*. 2021. Т. 23. № 3. С. 8–16.
3. Gell M. Dynamic carbon footprinting // *International Journal of Green Economics*. 2008. № 2. P. 269–283.
4. Ecological footprint / M. Wackernagel [et al.]; Fath B. (ed.) // *Encyclopedia of Ecology*, 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2019. Vol. 4. P. 270–282.
5. Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation / M. Mancini [et al.] // *Ecological Indicators*. 2016. № 61. P. 390–403.

6. Green housing evaluation through carbon footprint dynamic model: Questioned the urban policy sustainability / M.S. Dewi [et al.] // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 227. P. 317–324.
7. Вакуленко Н.В., Нигматуллин Р.И., Сонечкин Д.М. К вопросу о глобальном изменении климата // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 89–97.
8. Переведенцев Ю.П., Аухадеев Т.Р., Шанталинский К.М. Пространственно-временная изменчивость атмосферного давления и температуры воздуха в Северном полушарии // *Российский журнал прикладной экологии*. 2016. № 3. С. 3–9.
9. Wallace J.M., Thompson D.W.J. Annual models and climate prediction // *Physics Today*. 2002. Vol. 56. Iss. 2. P. 28–33.
10. Королев И.С. Глобальное потепление и энергетический переход (внешнеэкономический аспект) // *Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН*. 2022. № 2. С. 13–22.
11. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK; New York, US: Cambridge University Press, 2021. 2338 p.
12. IPCC. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. 2006. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf (дата обращения: 25.08.2024).
13. Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации: распоряжение Минприроды России от 16 апр. 2015 г. № 15-р. URL: https://eipc.center/pdf/analitic/raspr_minprir_ros_16_04_2015_n_15.pdf?ysclid=lu3fkg4npv830667889 (дата обращения: 25.08.2024).
14. Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов: приказ Минприроды от 27 мая 2022 г. № 371. URL: https://carbonreg.ru/pdf/Общие_НПА/Приказ_Минприроды_РФ_от_27.05.2022_N_371 (дата обращения: 25.08.2024).
15. Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов ПГ организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации: приказ Минприроды России (Министерство природных ресурсов и экологии Рос. Федерации от 30 июня 2015 г. № 300). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71183290/?ysclid=m0ae1sibfw327430708> (дата обращения: 25.08.2024).
16. Smirnova E., Larionova Yu. Problem of environmental safety during construction (analysis of construction impact on environment) // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 07006.
17. Shulver I., Slade S. Application of environmental impact assessment to the control of emissions from flat glass furnaces / J. Kieffer (ed.) // *A Collection of Papers Presented at the 60th Conference on Glass Problems (Ser.: Ceramic Engineering and Science Proceedings)*. Westerville, OH: The American Ceramic Society, 2008. Vol. 21. Iss. 1. P. 169–182.
18. Quantification of carbon emission of construction waste by using streamlined LCA: A case study of Shenzhen, China / H. Wu [et al.] // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2015. Vol. 17. P. 637–645.
19. Wiedmann T., Minx J. A definition of 'carbon footprint' / C.C. Pertsova (ed.) // *Ecological Economics Research Trends*. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2008. P. 1–11.
20. Antony C. What is a reasonable commute time and distance to work in 2024? URL: <https://hqhire.com/reasonable-commute-to-work/> (дата обращения: 25.08.2024).
21. Design of an efficient insulation system for a house in Zaouiat Sidi Abdeslam using Binayate software / M. Saidi [et al.] // *7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. Agadir, Morocco. Danvers, MA: IEEE 2019. P. 471–476.

References

1. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research / L. Yuan [et al.] // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 107. P. 107551.
2. Nekotorye vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii i regionov v plane global'nogo trenda dekarbonizatsii / D.K. Nurgaliev [i dr.] // *Georesursy*. 2021. T. 23. № 3. S. 8–16.
3. Gell M. Dynamic carbon footprinting // *International Journal of Green Economics*. 2008. № 2. P. 269–283.
4. Ecological footprint / M. Wackernagel [et al.]; Fath B. (ed.) // *Encyclopedia of Ecology*, 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2019. Vol. 4. P. 270–282.
5. Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation / M. Mancini [et al.] // *Ecological Indicators*. 2016. № 61. P. 390–403.
6. Green housing evaluation through carbon footprint dynamic model: Questioned the urban policy sustainability / M.S. Dewi [et al.] // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 227. P. 317–324.
7. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. K voprosu o global'nom izmenenii klimata // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015. № 9. S. 89–97.
8. Perevedencev Yu.P., Auhadeev T.R., Shantalinskij K.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' atmosfernogo davleniya i temperatury vozduha v Severnom polusharii // *Rossiiskij zhurnal prikladnoj ekologii*. 2016. № 3. S. 3–9.
9. Wallace J.M., Thompson D.W.J. Annual models and climate prediction // *Physics Today*. 2002. Vol. 56. Iss. 2. P. 28–33.
10. Korolev I.S. Global'noe poteplenie i energeticheskij perekhod (vneshneekonomicheskij aspekt) // *Analiz i prognoz. Zhurnal IMEMO RAN*. 2022. № 2. S. 13–22.
11. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK; New York, US: Cambridge University Press, 2021. 2338 p.
12. IPCC. Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov MGEIK. 2006. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf (data obrashcheniya: 25.08.2024).
13. Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendacij po provedeniyu dobrovol'noj inventarizatsii ob"ema vybrosov parnikovyh gazov v sub"ektah Rossijskoj Federacii: rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 16 apr. 2015 g. № 15-r. URL: https://eipc.center/pdf/analytic/raspr_minprir_ros_16_04_2015_n_15.pdf?ysclid=lu3fkg4npv830667889 (data obrashcheniya: 25.08.2024).
14. Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob"emov vybrosov parnikovyh gazov i pogloshchenij parnikovyh gazov: prikaz Minprirody ot 27 maya 2022 g. № 371. URL: https://carbonreg.ru/pdf/Obshchie_NPA/Prikaz_Minprirody_RF_ot_27.05.2022_N_371 (data obrashcheniya: 25.08.2024).
15. Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob"ema vybrosov PG organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi hozyajstvennyuyu i inuyu deyatelnost' v Rossijskoj Federacii: prikaz Minprirody Rossii (Ministerstvo prirodnyh resursov i ekologii Ros. Federacii ot 30 iyunya 2015 g. № 300). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71183290/?ysclid=m0ae1sibfw327430708> (data obrashcheniya: 25.08.2024).
16. Smirnova E., Larionova Yu. Problem of environmental safety during construction (analysis of construction impact on environment) // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 07006.
17. Shulver I., Slade S. Application of environmental impact assessment to the control of emissions from flat glass furnaces / J. Kieffer (ed.) // *A Collection of Papers Presented at the 60th Conference on Glass Problems (Ser.: Ceramic Engineering and Science Proceedings)*. Westerville, OH: The American Ceramic Society, 2008. Vol. 21. Iss. 1. P. 169–182.

18. Quantification of carbon emission of construction waste by using streamlined LCA: A case study of Shenzhen, China / H. Wu [et al.] // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2015. Vol. 17. P. 637–645.

19. Wiedmann T., Minx J. A definition of 'carbon footprint' / C.C. Pertsova (ed.) // Ecological Economics Research Trends. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2008. P. 1–11.

20. Antony C. What is a reasonable commute time and distance to work in 2024? URL: <https://hghire.com/reasonable-commute-to-work/> (data obrashcheniya: 25.08.2024).

21. Design of an efficient insulation system for a house in Zaouiat Sidi Abdeslam using Binayate software / M. Saidi [et al.] // 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). Agadir, Morocco. Danvers, MA: IEEE 2019. P. 471–476.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.04.2024; одобрена после рецензирования: 22.08.2024; принята к публикации: 28.08.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 25.04.2024; approved after review: 22.08.2024; accepted for publication: 28.08.2024

Информация об авторах:

Смирнова Елена Эдуардовна, доцент Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4), кандидат технических наук, доцент, e-mail: esmirnovae@yandex.ru, SPIN-код: 6365-0860

Данилович Геннадий Федорович, управляющий компанией ООО «Стандарт Систем Безопасности» (197706, Санкт-Петербург, Сестрорецк, ул. Воскова, д. 2, лит. АИ, помещение 1-н секция 18 (часть), e-mail: danilovich@yandex.ru

Мамедов Назим Магомед оглы, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: m.nazim68@mail.ru, SPIN-код: 9209-8667

Information about the authors:

Smirnova Elena E., docent of Saint-Petersburg state university of architecture and civil engineering (190005, Saint-Petersburg, Vtoraja Krasnoarmejskaja str., 4), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: esmirnovae@yandex.ru, SPIN: 6365-0860

Danilovich Gennadiy F., chief executive officer of the company LLC «Standard Security Systems» (197706, Saint-Petersburg, Sestroretsk, Voskova str., 2, lit. AI, room 1 section 18 (part), danilovich@yandex.ru

Mamedov Nazim Magomed ogly, associate professor of the department of fire safety of buildings and automated fire extinguishing systems of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: m.nazim68@mail.ru, SPIN: 9209-8667